

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

Obrábění laserem materiálů s proměnlivou tloušťkou

Laser Cutting Materials with Variable Thickness

Student :

Bc. Martin Grepl

Vedoucí diplomové práce:

Mgr.Ing. Jana Nováková

Ostrava 2010

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění a montáže

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Martin Grepl**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie
Téma: **Obrábění laserem materiálů s proměnlivou tloušťkou**
Laser Cutting Materials with Variable Thickness

Zásady pro vypracování:

1. Úvod do problematiky obrábění laserem
2. Návrh experimentu
3. Měření a vyhodnocení dat
4. Technicko-ekonomické zhodnocení

Seznam doporučené odborné literatury:


BILÍK, O. *Obrábění II, 1. díl*. Ostrava : VŠB-TU Ostrava. 1999, II. vydání. ISBN 80-7078-962-X.
BILÍK, O. *Obrábění II, 2. díl*. Ostrava : VŠB-TU Ostrava. 2001, II. vydání. ISBN 80-7078-944-1.
ČEP, R.; BRYCHTA, J.; SADÍLEK, M.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2007. s. 251. ISBN 978-80-248-1505-3.
NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; ČEP, R.; TABAČEK, M. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábání*. Žilina : EDIS Žilina, 2007. s. 343. ISBN 978-80-8070-711-8.
VASILKO, K.; HAVRILA, M.; MARCINCIN-NOVÁK, J.; MÁDL, J.; ZAJAC, J.. *Top trendy v obrábání, III. část – Technologie obrábění*. Žilina : Media/ST, s.r.o Žilina, 2006. s. 214. ISBN 80-968954-2-7.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Mgr. Ing. Jana Nováková**

Datum zadání: 18.12.2009

Datum odevzdání: 21.05.2010



prof. Dr. Ing. Josef Brychta
vedoucí katedry



prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucí diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.


V Ostravě 18. května 2010

Martin Grepl
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : 18. května 2010


.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce: Bc. Martin Grepl

Adresa trvalého pobytu autora práce: Trnkova 557/12, Olomouc, 779 00

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

GREPL, M. *Obrábění laserem materiálů s proměnlivou tloušťkou : diplomová práce.* Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2010, 75 s. Vedoucí práce: Nováková, J.

Diplomová práce se zabývá aplikací laserové technologie a optimalizací parametrů v oblasti řezání niklové slitiny. Teoretická část práce obsahuje popis jednotlivých druhů laserů, principů, na kterých pracují a oblastí jejich využití. Experimentální část je zaměřena na optimalizaci parametrů řezání slitiny Haynes 718 na plynovém CO₂ laseru, která je v tomto případě využívána pro výrobu dílců leteckého průmyslu. Na hodnocení takto vzniklých řezů je nahlíženo především z hlediska kvality řezu a doprovodných nežádoucích jevů, vznikajících při procesu samotném. Závěrem jsou popsány a zhodnoceny výsledky dosažené v metalografické laboratoři. Práce vznikla ve spolupráci s firmou Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

GREPL, M. *Laser Cutting Materials with Variable Thickness : Master Thesis.* Ostrava : VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining and Assembly, 2010, 75 p. Thesis head: Nováková, J.

The aim of this study concerns the application of laser technology and the optimization of the parameters concerning section of nickel alloy. The theoretical part includes a description of individual types of lasers, their principles and usage. The experimental part focuses on the optimization of section parameters of the Haynes 718 alloy using a gas CO₂ laser. This alloy is employed in production of components utilized by the aircraft industry. The actual section is measured with respect to its quality and any accompanying side effects which occur during the process. The summary explains the results achieved in a metallographic laboratory. This study was carried out in association with Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o.

Obsah

	strana
Seznam použitých značek a symbolů	9
0 Úvod.....	10
1 Historický přehled vývoje laseru	12
2 Princip a konstrukce laseru.....	16
2.1 Princip laseru.....	16
2.2 Konstrukce laseru.....	19
2.2.1 Laserová hlavice	19
2.2.2 Budicí zařízení.....	20
2.2.3 Chladicí zařízení	21
3 Klasifikace laserů	22
3.1 Pevnolátkové lasery	23
3.2 Kapalinové lasery.....	24
3.3 Plynové lasery	24
3.3.1 Atomární lasery	25
3.3.1.1 Helium-neonový laser.....	25
3.3.1.2 Měděný laser.....	26
3.3.1.3 Jodový laser	26
3.3.2 Iontové lasery	27
3.3.2.1 Argonový laser.....	27
3.3.2.2 Helium-kadmiový laser.....	27
3.3.3 Molekulární lasery	28
3.3.3.1 Vodíkový laser.....	28
3.3.3.2 Dusíkový laser	28
3.3.3.3 Excimerové lasery.....	29

3.3.3.4 CO ₂ laser	29
3.3.3.5 CO laser	31
3.4 Plazmatické lasery	32
3.5 Polovodičový laser	33
4 Aplikace laserové technologie	35
4.1 Řezání a dělení materiálu	35
4.2 Vrtání	36
4.3 Svařování	38
4.4 Nanášení povlaků	39
4.5 Ostatní oblasti využití	39
4.5.1 Lasery v medicíně	40
4.5.2 Další laserové technologie uplatňované v průmyslu	40
4.5.3 Lasery v mikroelektronice	41
4.5.4 Lasery v astronomii, geodézii a geofyzice	41
4.5.5 Lasery ve výpočetní technice	41
5 Experimentální část	42
5.1 Zařízení, využité při realizaci experimentu	42
5.1.1 Laserový stroj Winbro Delta	42
5.1.2 Zdroj Rofin DC 020	43
5.2 Obráběný materiál	44
5.3 Návrh experimentu	45
5.3.1 Vzorek č. I. – plech tloušťky 2,5 mm (slitina Haynes 718)	46
5.3.2 Vzorek č. II. – plech tloušťky 3,2 mm (slitina Haynes 718)	50
5.3.3 Vzorek č. III. – plech tloušťky 5,0 mm (slitina Haynes 718)	53
6 Měření a vyhodnocení dat	56
6.1 Metody vyhodnocování	56
6.2 Metalografické hodnocení	56

6.2.1 Rámcový postup přípravy metalografických výbrusů.....	57
6.3 Dokumentace metalografických výbrusů.....	58
7 Diskuze experimentálních prací.....	65
7.1 Kontrolované parametry.....	65
7.2 Grafické znázornění kontrolovaných parametrů.....	66
7.3 Alternativa jiné technologie výroby.....	69
7.4 Závěrečná doporučení.....	70
8 Závěr.....	71
9 Seznam použité literatury.....	73
10 Seznam příloh.....	75

Seznam použitých značek a symbolů

Symbol	Význam	Jednotka
Al_2O_3	- oxid hlinitý	[-]
ArF	- fluorid argonu	[-]
Ar^+	- kationt argonu	[-]
AWJ	- Abrasive Water Jet (abrazivní vodní paprsek)	[-]
CAM	- Computer Aided Manufacturing (počítačem podporovaná výroba)	[-]
Cd^+	- kationt kadmia	[-]
CdS	- kadmium sulfid	[-]
CdSe	- kadmium selen	[-]
CF_3I	- trifluor-jodmethan	[-]
CO	- oxid uhelnatý	[-]
CO_2	- oxid uhličitý	[-]
Er:YAG	- yttrium-aluminium-granát dopovaný erbiem	[-]
GaAs	- galium arsenid	[-]
HCN	- kyanovodík (k. kyanovodíková)	[-]
HF	- fluorovodík (k. fluorovodíková)	[-]
h	- Planckova konstanta	[J.s]
KrF	- fluorid kryptonu	[-]
LASER	- L ight A mplification by S timulated E mission of R adiation (zesilování světla pomocí stimulované emise záření)	[-]
MASER	- M icrowave A mplification by S timulated E mission of R adiation (zesilování mikrovln pomocí stimulované emise záření)	[-]
Nd:YAG	- yttrium-aluminium-granát dopovaný neodymem	[-]
Nd:YLF	- lithium-yttrium-fluorid dopovaný neodymem	[-]
SiC	- karbid křemíku	[-]
TEM	- T ransverse E lectromagnetic M ode (příčné elektromagnetické pole)	[-]
XeCl	- chlorid xenonu	[-]
λ	- vlnová délka	[μm]

0 Úvod

Tato práce si vzala za úkol nastínit možnosti využití laserové technologie, především pak její aplikaci v oblasti 3D řezání materiálů používané ve výrobě. Vznikla ve spolupráci s firmou Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o., která se zabývá výrobou a opravou plechových a žárových dílů leteckých turbínových motorů z nerezavějících ocelí a speciálních slitin.

Teoretická část práce představuje průřez od historického přehledu vývoje laseru až po jeho dnešní uplatnění. Snaží se také v krátkosti, na základě pojmů kvantové fyziky, objasnit princip vzniku a fungování laserového záření. Popisuje hlavní konstrukční části laserového zařízení a klasifikuje lasery do jednotlivých skupin podle mnoha kritérií, především pak z hlediska aktivního prostředí laserů. Na konec se snaží pojmut obrovské množství možností aplikace laserové technologie.

Experimentální část je definovaná potřebami zadavatele, jímž je Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o. Hlavním úkolem této části práce, zabývajících se laserovým řezáním slitin určených pro aplikace v leteckém průmyslu, bylo optimalizovat řezné parametry laseru. V závislosti na nich, typu a geometrii obráběného materiálu a dalších faktorech majících vliv na výsledný řez, byla snaha o dosažení přijatelného řezu slitinou, splňující požadované kvalitativní parametry.

Cílem práce bylo zjistit, jakou maximální tloušťku plechu této skupiny slitin dokáže laserový systém Winbro Delta, vybavený zdrojem Rofin DC 020, prořezat. Podle informací od výrobce stroje to mělo být, u podobného typu materiálů, maximálně 6 mm. To bylo důležité z hlediska zavedení další výroby na toto pracoviště. Také bylo potřeba popsat vliv parametrů řezání na výslednou strukturu řezu z hlediska tvarových deformací řezné spáry a vzniku přetavené vrstvy, která je nežádoucím doprovodným jevem procesu řezání.

Veškeré úkony experimentu, související s řezáním slitiny, byly realizovány na laserovém systému Winbro Delta, který umožňuje 3D řezání rozmanitých součástí. Je doplněný o zdroj Rofin DC 020 a vybavený řídicím systémem Heidenhain iTNC 530. Jedná se o plynový CO₂ laser, pracující v kontinuálním režimu.

Pro realizaci experimentálních prací nám byl k našim potřebám poskytnut materiál Haynes 718. Jedná se o vysokopevnostní slitinu, která se řadí ke skupině niklových slitin. Vzorky byly vytvořeny z plechů o třech různých tloušťkách, a sice 2,5 mm, 3,2 mm a 5,0 mm. Tento typ materiálu a jeho tloušťky byly vybrány záměrně, z důvodu jeho využívání přímo ve výrobě.

V závěru jsou pak zhodnoceny výsledky dosažené při experimentu a je doporučený další postup při řešení problematiky této práce.

1 Historický přehled vývoje laseru

Ještě na počátku našeho letopočtu rostla na území dnešní Libye velmi vzácná a proslavená rostlina, kterou Římané nazývali Laser nebo Laserpitium. Díky jejím zázračným vlastnostem ji považovali za božský dar. Používali ji k léčení řady nemocí, při uštknutí hadem nebo škorpiónem, při zranění otráveným šípem. Používali ji též jako koření v nejlepší kuchyni, neboť měla velmi výraznou chuť. S velkým úspěchem byla vyvážena do Řecka i Říma. Římané se ji pokoušeli pěstovat ve své zemi, ale bez úspěchu. Asi ve druhém století však tato rostlina prý zcela vymizela.

*Laser ... inter eximia naturae dona numeratum plurimis
compositionibus inseritur.*

*(Laser ... jeden z nejvzácnějších darů přírody mající
rozmanité použití.)*

Plinius St.: Naturalis Historia XXII, 49 (1.stol.n.l.)



Obr. 1 Laserpitium [8]

Naše doba pak slovo laser odvodila jako zkratku (první písmena anglického názvu) pro **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation (zesilování světla pomocí stimulované emise záření) a používá je k označení novodobého zdroje optického záření založeného na principu stimulované emise. První laser (rubínový) byl sestrojen Američanem T. H. Maimanem, který jej poprvé uvedl v činnost 15. května 1960. Dodatečně se ukázalo, že optické záření vysílané laserem se výrazně liší od záření vysílaného jinými zdroji (žárovkou, výbojkou, sluncem). Takže i o našem „novodobém“ laseru je možné prohlásit, že má svou zvláštní „výraznou chuť“. Během následujících třiceti let bylo objeveno a odzkoušeno také mnohé „rozmanité použití“ [1].

Lasery našly široké využití v celé řadě oborů. Při vědecké práci v astronomii, v optice, ve výzkumu vlastností materiálů a v dalších oborech základního výzkumu a mnoha dalších oborech.

Historie laseru začíná v roce 1916, kdy Albert Einstein ve své práci “Emise a absorpce světla podle kvantové teorie” poprvé poukázal na možnost, že kromě jevů jako jsou spontánní emise a absorpce, musí existovat ještě další jev a to emise stimulovaná, která představuje základní princip kvantové mechaniky.

Každý zdroj světla představuje souhrn velkého množství excitovaných atomů, kterým je jednorázově anebo nepřetržitě dodávána energie. Tato energie může být zprostředkována tepelným pohybem, elektrickým proudem a světlem. Charakteristickým rysem excitovaných atomů je jejich samostatnost, vzájemná nezávislost, v důsledku čehož tyto atomy vyzařují tepelná kvanta spontánně, samovolně. Einstein ukázal, že atomy můžou vyzařovat světlo nejen spontánně, ale i vynuceným způsobem (stimulovaně) pod vlivem záření atomů, pokud toto záření zastihne už excitovaný, vybuzený atom, připravený vyzářit.[2]

Myšlenku vytvořit první laser začal naplňovat ruský fyzik V. A. Fabrikant, který v roce 1939 poukázal na možnost použití stimulované emise k zesílení elektromagnetického záření procházejícího prostředím. Pozastavil se nad problematikou inverze populace energetických hladin mikrosystémů. Později (v r.1951), spolu s M. M. Vudynským a F. A. Butajevovou přihlásili patent na metodu zesilování elektromagnetického záření (ultrafialového, viditelného, infračerveného a pásma rádiových vln) tím způsobem, že záření prochází prostředím, ve kterém je vytvořen nerovnovážný stav. Což si lze představit jako stav takového charakteru, že je preferováno obsazení horních energetických stavů atomů, popř. jiných elementů prostředí.

Poprvé byla tato idea realizována pro zesilování záření v mikrovlnné oblasti. V roce 1952 moskevští fyzikové N. G. Basov a A. M. Prochov na konferenci o Radiospektroskopii referovali o molekulárním svazkovém generátoru – MASERu pracujícím se svazkem molekulárního čpavku. Prakticky současně byla vyjádřena myšlenka použití stimulované emise k zesílení a generaci milimetrových vln americkým fyzikem C. H. Townesem.

V roce 1954 byl sestaven první takový molekulární generátor. Realizace maseru (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation) dala vznik novému vědnímu oboru – kvantové elektronice. Basov, Prochorov a Townes dostali společně za vynález maseru Nobelovu cenu v r. 1964.

Mezi realizací prvního maseru a prvního laseru uplynulo šest let. V uvedeném období se intenzivně hledaly:

1. rezonátor pro vlnové délky z optické oblasti spektra, (neboť dutinový rezonátor pro cm a mm vlnové délky měl cm a mm rozměry a pro vlnové délky v okolí μm by měl mít rezonátor mikronové rozměry, což je stěží uskutečnitelné)

2. metody realizující inverzní populaci hladin na kvantových přechodech v optické oblasti.

V roce 1955 N. G. Basov a A. M. Prochorov navrhli optické buzení a prostředek pro dosažení inverze populace. V roce 1957 pak N. G. Basov uvažoval o využití polovodičových materiálů pro kvantové oscilátory a realizoval optický rezonátor leštěnými planparalelními stěnami na polovodičovém čipu. V téže roce Fabrikant a Butajeva pozorovali zesílení optického záření v experimentu s elektrickým výbojem procházejícím směsí par rtuti, vodíku a helia. V roce 1958 A. M. Prochorov, A. Schawlow C. Townes vyslovili nezávisle na sobě ideu, že jev stimulované emise, užitý v maseru, může být použit i v infračervené a optické oblasti spektra. R. H. Dicke (Princeton University) navrhl použití otevřeného rezonátoru pro realizaci kladné zpětné vazby v optické oblasti.[1]

V roce 1960 byl Theodorem Maimanem zkonstruován rubínový laser, využívající rubín a výbojku. Jednalo se o krychličku ze syntetického rubínu o hraně 1cm. Nejdříve se však musely vyřešit důležité věci - tzv. aktivní prostředí, v němž se dá dosáhnout inverzní populace a také jak v něm udržet světlo dostatečně dlouho na to, aby se mohlo zesílit.

Pomohla optika a nabídla tzv. rezonátor, tj. 2 planparalelně (rovnoběžně) uložená zrcadla (ať už rovinná nebo dutá či vypuklá), mezi které se vloží aktivní prostředí.



Obr. 2 Theodore Maiman a jeho rubínový laser [7]

V témže roce (1960) A. Javan, W. R. Bennett a D. R. Herriott demonstrovali laserovou akci ve směsi plynů helia a neonu. Od roku 1961 začal bouřlivý vývoj různých typů laserů zároveň s vývojem laserové technologie. První polovodičový laser byl sestaven v r.1962.

V současnosti je nejvýznamnějším objevem laser vláknový, z oblasti polovodičových laserů, které jsou nyní masově nasazovány do průmyslových provozů. Velká účinnost, pouze vzduchové chlazení, malé rozměry, vysoká kvalita paprsku, dlouhá životnost, to je jen část předností těchto laserů. Budoucnost hovoří pro vláknové lasery, i když tyto nenahradí všechny aplikace.

V blízké budoucnosti pravděpodobně nebude existovat „disruptive technology“, tedy nová laserová technologie, která nahradí všechny zdroje laserových paprsků. I v budoucnu bude používána široká paleta různých laserových technologií.

2 Princip a konstrukce laseru

2.1 Princip laseru

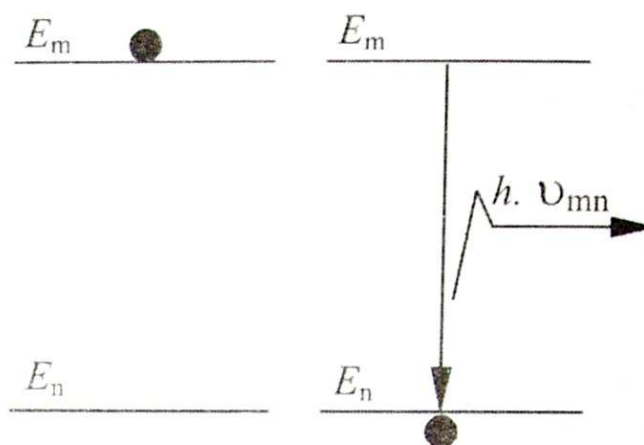
Princip funkce laseru je možné objasnit na základě pojmů kvantové fyziky a planetárního modelu atomu. I když přesný překlad akronymu laser znamená zesilování světla využitím stimulované emise, slovo laser se obecně používá především pro označení generátoru optického záření. Uvažujeme-li jen o zesilování optického záření, hovoříme o laserovém zesilovači [1].

Běžné světelné záření je vlnění, které se šíří všemi směry. Laserové světlo vzniká v prostředí určitého stimulujícího elektromagnetického záření potlačením spontánní emise na úkor vynucené emise záření. Spontánní (samovolná) emise záření vzniká, když vybuzené atomy s energetickou hladinou E_m mají tendenci zaujmout hladinu s nižší energií E_n ($m > n$) a při tom emitují kvantum světelného záření s frekvencí ν_{mn} [6]:

$$\nu_{mn} = (E_m - E_n) \cdot h^{-1} \quad (1)$$

kde:

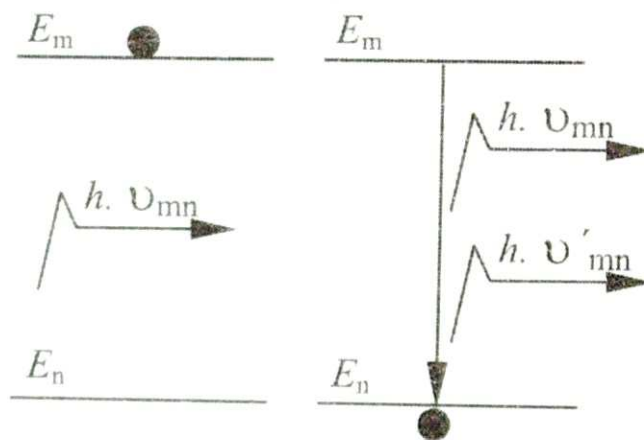
h – Planckova konstanta ($h = 6,62606896 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$) [6]



Obr. 3 Spontánní emise [14]

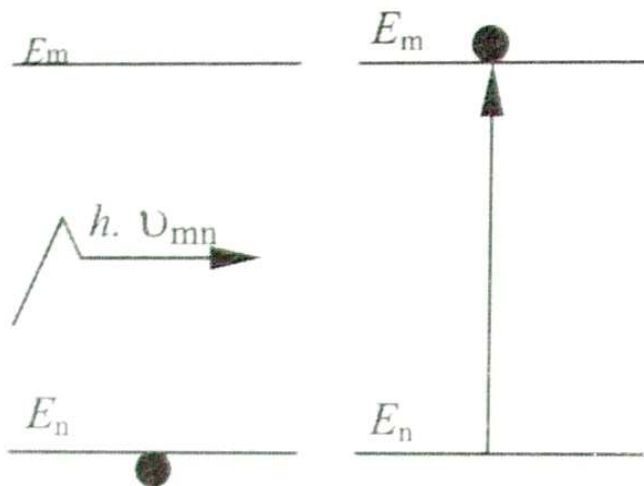
Vlivem vnějšího podnětu se vybuzený atom vrací do základního stavu, přičemž emituje nové kvantum se stejnou frekvencí, jako mělo kvantum předcházející.

Tento způsob emise se nazývá stimulovaná (vynucená) emise záření. V závislosti na rozdílu těchto hladin vzniká infračervené, ultrafialové nebo viditelné světelné záření [6].



Obr. 4 Vynucená emise [14]

Při běžných podmínkách se atom nachází v základním stavu. Přejít elektronů ze základní hladiny na vyšší energetickou hladinu provází absorpce a přechod vyšší hladiny na základní se nazývá emise, přičemž vzniká energie ve formě záření.

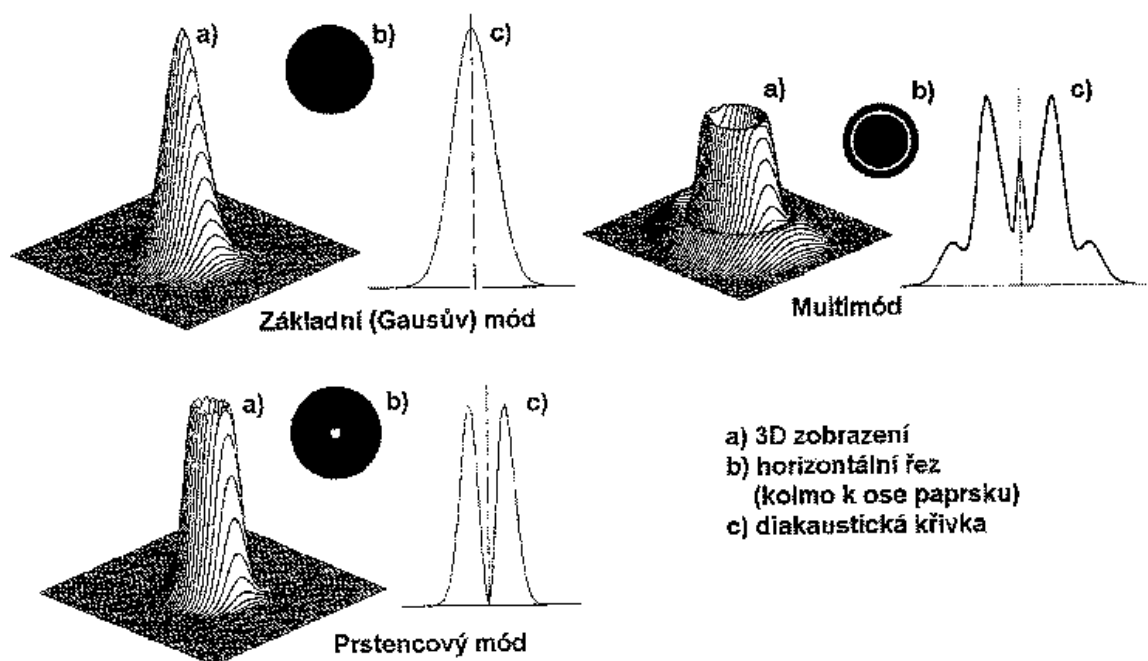


Obr. 5 Absorpce [14]

Atom můžeme přinutit k emisi záření vybuzením. Dodání příslušné energie pro dosažení vybuzeného stavu se nazývá čerpání. Laser je tedy kvantově elektronický zesilovač a generátor světelných vln [6].

Vlastnosti laserového záření [6]:

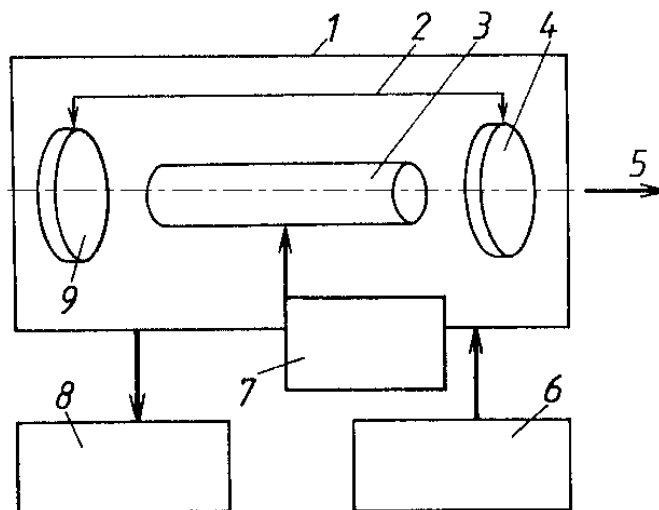
- je vysoce monochromatické – světlo v laserovém paprsku má prakticky jen jednu vlnovou délku,
- má vysoký stupeň prostorové a časové koherence, v prostorově koherenčním svazku kmitají všechny částice světelné vlny se stejnou fází v rovině kolmé na směr šíření svazku, v časově koherenčním svazku kmitají se stejnou fází všechny částice světelné vlny ve směru šíření laserového svazku,
- má minimální divergenci (rozbíhavost),
- má vysokou výstupní intenzitu, která není limitována zákony záření absolutně černého tělesa,
- má módobou strukturu (TEM – transverse electromagnetic mode). V příčném průřezu vytváří svazek buď jednoduchou stopu (základní mód), nebo složitější obrazce. Nejvyšší hustoty energie při dané výstupní energii laseru můžeme dosáhnout u laserů, pracujících v základním módu. Ten bývá označován jako TEM₀₀ (index charakterizuje symetrii elektromagnetického pole v rovině kolmé na směr šíření laserového svazku). Mód laseru určuje jeho vhodnost pro průmyslové použití.



Obr. 6 Modální struktura laseru [4]

2.2 Konstrukce laseru

Hlavní části každého laseru jsou:



Obr. 7 Schéma laseru [3]

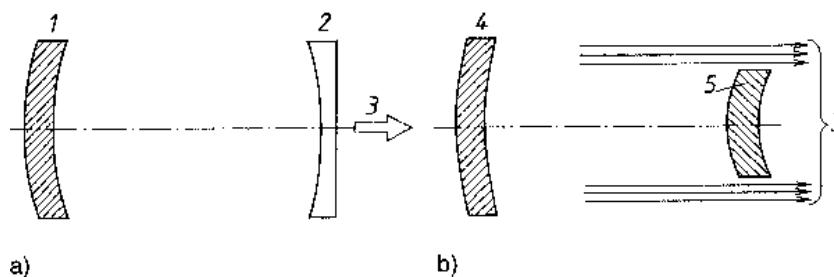
1 - laserová hlavička, 2 – rezonátor, 3 – laserové médium, 4 – polopropustné zrcadlo,
5 – výstupní záření, 6 – zdroj energie buzení, 7 – budicí zařízení, 8 – chladicí systém,
9 – nepropustné zrcadlo

2.2.1 Laserová hlavička

Tato hlavička obsahuje [3]:

- **laserové médium** – určuje délku vlny záření, je směsí několika materiálů s vhodnými energetickými hladinami ve vhodném nosném materiálu, který je průhledný a má schopnost odvádět vzniklé teplo. Laserové médium může být pevné, tekuté, plynné, případně to mohou být páry;
- **rezonátor** – optický systém umožňující zformovat a zesílit záření, z něj vycházející. Konstrukční uspořádání rezonátoru určuje vlastnosti svazku (koherenci, intenzitu záření, jeho pravidelnost, spektrální a prostorové charakteristiky).

Optický rezonátor sestává nejméně ze dvou zrcadel. Nejčastěji se používají sférická zrcadla v konfokálním stabilním nebo konfokálním nestabilním uspořádání. Průměr a zakřivení zrcadel určují rozdělení intenzity záření a rozbíhavost laserového záření (tj. divergenci svazku) – ta je dána rovinným nebo prostorovým úhlem, ve kterém se záření šíří [3].



Obr. 8 Uspořádání zrcadel optického rezonátoru [3]

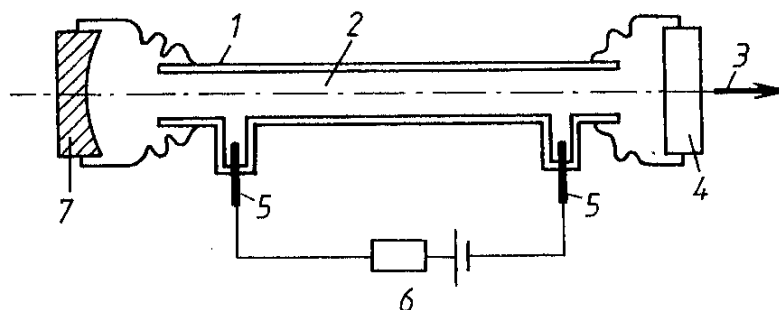
a) konfokální stabilní, b) konfokální nestabilní

1 – nepropustné zrcadlo, 2 – polopropustné zrcadlo, 3 – výstupní zařízení, 4 – zadní zrcadlo, 5 – přední zrcadlo

2.2.2 Budicí zařízení

Ovlivňuje pracovní režim laseru, způsob buzení je dán laserovým médiem.

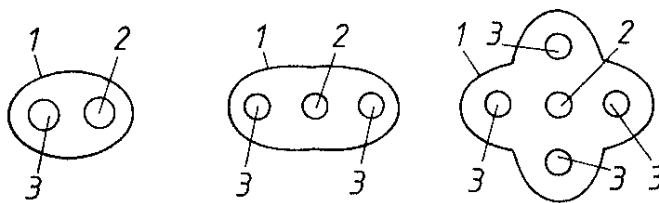
Plynné médium je téměř vždy buzeno elektrickým výbojem, stejnosměrným nebo střídavým proudem (podobně jako u zářivek). Lze však použít buzení chemickou reakcí, fotodisociací, rychlou expanzí plynu nebo opticky.



Obr. 9 Buzení elektrickým výbojem [3]

1 – laserová trubice, 2 – plynné laserové médium, 3 – výstupní záření, 4 – polopropustné zrcadlo, 5 – elektroda, 6 – budicí zařízení, 7 – nepropustné zrcadlo

Pevné laserové médium je nejčastěji buzeno lampami – výbojkami, ve zvláštních případech zářením jiného laseru (např. polovodičového) [3]. Výbojky jsou umělým nerovnovázným zdrojem optického záření. Buzení je realizováno elektrickým výbojem v plynu nebo v parách kovů, popřípadě v jejich směsích. Podle tlaku plynu, se kterým pracují, se dělí na doutnavky, nízkotlaké výbojky a vysokotlaké výbojky [1].



Obr. 10 Buzení výbojkami [3]

1 – rezonátor, 2 – laserové médium (krystal), 3 – budící výbojka

2.2.3 Chladicí zařízení

Slouží k odvodu nevyužitě energie, která se nepřemění v záření, ale v tepelnou energii. U laserů používaných při zpracování materiálů se nejčastěji používá chlazení vodou.

Chladicí okruh je složen ze dvou větví:

- vnitřní (používá se deionizovaná voda),
- vnější (voda z vodovodní sítě nebo speciálního zásobníku s čerpadlem).

Výrobci laserových zařízení dodávají také na přání speciální chladicí zařízení, u kterých je vnější okruh chlazen vzduchem.

3 Klasifikace laserů

Lasery mohou být klasifikovány podle různých hledisek, např. podle [1]:

- aktivního prostředí,
- vlnových délek optického záření, které vysílají,
- typu kvantových přechodů (energetických hladin),
- typu buzení,
- časového režimu provozu laseru.

Tradičně jsou lasery děleny do pěti kategorií podle typu aktivního prostředí:

- pevnolátkové lasery,
- kapalinové lasery,
- plynové lasery,
- plazmatické lasery,
- polovodičové lasery.

Dělení podle vysílaných vlnových délek:

- infračervené lasery,
- viditelného pásma lasery,
- ultrafialové lasery,
- rentgenové lasery.

Dělení podle energetických hladin zúčastněných při laserovém kvantovém přechodu:

- molekulární (rotační, rotačně-vibrační, vibrační),
- elektronové,
- jaderné.

Dělení podle časového režimu provozu:

- impulzní,
- kontinuální.

Dělení podle délky generovaného impulzu – lasery:

- s dlouhými impulzy,
- s krátkými impulzy,
- s velmi krátkými impulzy (pikosekundové, femtosekundové).

Dělení podle typu buzení. Lasery buzené:

- opticky,
- elektrickým výbojem,

- elektronovým svazkem,
- tepelnými změnami,
- chemicky,
- rekombinací,
- injekcí nosičů náboje.

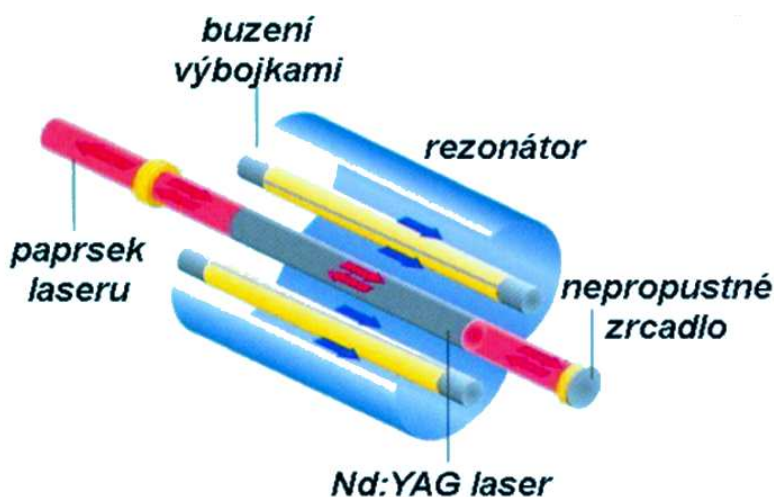
3.1 Pevnolátkové lasery

Aktivním prostředím je dielektrikum, tj. pevná, opticky propustná látka. Krystal vybroušený do tvaru válce, kotouče nebo hranolu, jehož čela jsou opticky vyleštěna.

Krystal může být vyroben z [3]:

- rubínu (Al_2O_3 s příměsí Cr),
- yttrium-aluminium-granátu dopovaného neodymem (Nd:YAG),
- lithium-yttrium-fluoridu dopovaného neodymem (Nd:YLF),
- yttrium-aluminium-granátu dopovaného erbiem (Er:YAG),
- skla (technická).

Pro technologické operace se převážně používá krystal Nd:YAG.



Obr. 11 Princip Nd:YAG laseru [5]

Základním materiálem, který určuje většinu technických vlastností daného krystalu, je u pevnolátkových laserů matrice, která musí být průzračná, opticky homogenní a musí být technologicky možné ji uměle vyrábět.

Materiály, vyhovující těmto požadavkům, jsou:

- krystaly (oxidy, granáty, alumináty, fluoridy, oxysulfidy, fosfáty a silikáty),
- skla,
- keramika.

Koherentní svazek pevnolátkových laserů má vlnovou délku $\lambda = 1,06 \mu\text{m}$, maximální výstupní výkon 4 kW, pracuje v kontinuálním i pulzním režimu. Účinnost pevnolátkových laserů je velmi malá, 3 až 8 % [2].

3.2 Kapalinové lasery

Laserovým médiem jsou roztoky organických barviv nebo speciálně připravené kapaliny dopované ionty vzácných zemin. Ve většině případů se kapalinové lasery objevují s aktivním prostředím tvořeným organickými barvivy. Organická barviva jsou komplexy organických sloučenin mající široká absorpční pásma ve viditelné a blízké ultrafialové oblasti spektra. Do dnešní doby byla generace laserového záření ověřena u více než 200 různých barviv. Výběrem vhodného barviva a zrcadel otevřeného rezonátoru je možné získat koherentní záření o jakékoli vlnové délce rozmezí od $0,3 \mu\text{m}$ do $1,3 \mu\text{m}$. Účinnost kapalinových laserů je řádově v desítkách procent [1].

Pro buzení barvivových laserů je používáno optické záření. Optické buzení těchto laserů je nekoherentní nebo koherentní, pulzní nebo kontinuální a příčné nebo podélné.

Použití kapalinových laserů je především ve spektroskopii, neboť umožňují naladění přesné vlnové délky. Novou aplikací je využití této vlastnosti také v medicíně.

3.3 Plynové lasery

Jelikož experimentální část této práce bude realizována na laseru plynovém, budou tyto popsány podrobněji, než ostatní zde uvedené druhy laserů.

Jedná se o lasery s aktivním prostředím v plynné fázi. Inverze populace hladin je vytvářena mezi energetickými hladinami některé ze složek plynu (atomů, iontů, molekul). Plynové lasery většinou pracují v kontinuálním režimu, ovšem byly vyvinuty i lasery pracující v impulzním režimu, které dosahují mimořádně vysokých výkonů.

Plynové lasery mají řadu společných vlastností vyplívajících ze specifických vlastností plynného prostředí, a sice:

- optický svazek bývá při průchodu aktivním prostředím méně deformován než u laserů s kondenzovaným prostředím (díky obecně větší homogenitě plynů),
- rozbíhavost výstupního svazku je malá,
- šířky spektrálních čar jsou velmi malé, což umožňuje dosáhnout vysokou stabilitu frekvence vystupujícího záření,
- nevýhodou plynových laserů jsou jejich malé výkony, způsobené poměrně malou objemovou hustotou počtu částic (proto musí být výkonové plynové lasery velmi rozměrné).

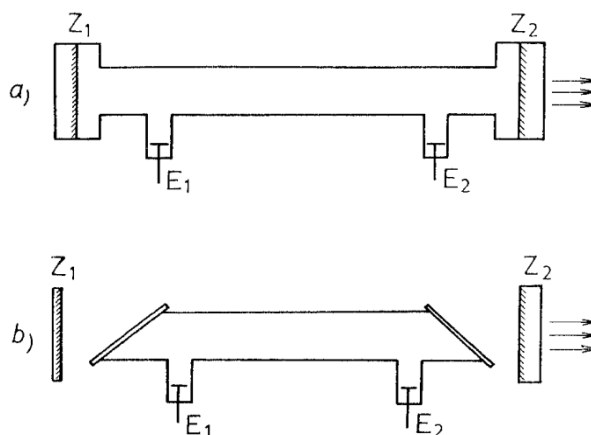
Buzení plynových laserů lze provádět různými metodami: elektrickým výbojem, chemickou reakcí, fotodisociací, rychlou expanzí plynu, průchodem svazku rychlých elektronů nebo opticky.

3.3.1 Atomární lasery

Aktivním prostředím těchto laserů jsou elektricky neutrální, v molekulách nevázané, atomy.

3.3.1.1 Helium-neonový laser

Aktivní prostředí je tvořeno vybuzenými (excitovanými) atomy neonu v kontinuálním doutnavém elektrickém výboji ve směsi plynů helia a neonu. Rychlost i účinnost buzení závisejí především na: složení směsi, tlaku plynu, elektronové teplotě a proudové hustotě ve výboji. Výbojová trubice má nejčastěji průměr 5 až 10 mm při tlaku plynu 100 až 200 MPa a poměru tlaků plynů helia a neonu 5 : 1 až 15 : 1 [1]. Výstupní výkon se pohybuje v desítkách miliwattů pro červené světlo, v infračervené oblasti jsou pak výstupní výkony o řád vyšší. Po konstrukční stránce se ustálily dvě varianty optického rezonátoru.



Obr. 12 Helium-neonový laser [1]

a) s vnitřním rezonátorem, b) s vnějším rezonátorem

E_1, E_2 – elektrody výbojové trubice; Z_1, Z_2 – zrcadla optického rezonátoru

3.3.1.2 Měděný laser

Aktivní prostředí je tvořeno neutrálními atomy mědi. Vysílá zelené světlo s vlnovou délkou 510,5 nm a 578,2 nm [1]. Inverze populace mezi energetickými hladinami se vytváří v elektrickém výboji ve směsi par mědi a dalšího plynu (helia, argonu). Jelikož tlak měděných par ve výbojové trubici musí být dostatečně velký, pracují tyto lasery při velmi vysoké teplotě (1800 K) a trubice je umístěna v peci. Měděný laser pracuje pouze v pulzním režimu a jeho střední výstupní výkon bývá až 40 W při opakovací frekvenci větší než 10 kHz. Účinnost se pohybuje pouze okolo jednoho procenta, ovšem tyto lasery jsou dosud nejúčinnější v zelené oblasti spektra.

3.3.1.3 Jodový laser

Jodový atomární laser generuje viditelné nebo infračervené záření v důsledku stimulované emise na kvantových přechodech vybuzeného atomu jodu. Podle způsobu buzení je možné jodové lasery rozdělit na fotodisociační lasery a lasery buzené rezonančním přenosem energie [1].

3.3.2 Iontové lasery

Aktivní prostředí těchto laserů je tvořeno ionty vzácných prvků nebo ionty par kovů (Sn, Pb, Zn, Cd, Se).

Společné vlastnosti iontových laserů:

- generace záření na několika vlnových délkách ve viditelné a blízké infračervené oblasti spektra,
- poměrně vysoké požadavky na budicí výkon.

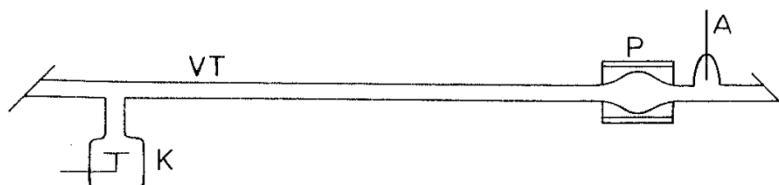
3.3.2.1 Argonový laser

Aktivní prostředí laseru tvoří ionty argonu. Vlnové délky záření jsou [1]: 457,9 nm, 465,7 nm, 472,7 nm, 488,0 nm, 496,5 nm a 514,5 nm. Buzení je uskutečňováno silnoproudým elektrickým výbojem, kdy budícím mechanismem jsou nepružné srážky elektronů s atomy a ionty argonu. Jelikož buzení probíhá stupňovitě, výstupní výkon roste s druhou mocninou proudové hustoty.

3.3.2.2 Helium-kadmiový laser

Jedná se o laser pracující s ionty kovu, buzený elektrickým výbojem, ve kterém se nejdříve excituje a ionizuje helium, jehož atomy pak dávají vznik iontům kadmia.

Zvláštní konstrukcí laseru je nutné zajistit stálé dodávání nových atomů iontů Cd do výboje. Poblíž anody se proto umísťuje píčka pro ohřev a odpařování kadmia. Celá výbojová trubice se ohřívá na teplotu 550 až 600 K, aby se zabránilo kondenzaci par na stěnách. Typické provozní parametry jsou tlak He 500 až 650 Pa, délka trubice 85 cm, vnitřní průměr 4 mm, proud výboje 80 mA a výstupní výkon 3 mW [1].



Obr. 13 He-Cd laser [1]

VT – výbojová trubice, A – anoda, K – katoda, P – píčka

3.3.3 Molekulární lasery

Molekuly mají ve srovnání s atomy poměrně široká spektra energetických hladin. Každá hladina molekulární (elektronická) příslušející k jisté konfiguraci elektronů se dále štěpí na vibrační podhladiny, tj. hladiny energie příslušející různému stupni excitace vibračního pohybu atomů tvořících molekul. Každá vibrační podhladina je pak dále složena z rotačních podhladin. V molekulách je možné vytvářet inverzi populace hladin mezi energetickými hladinami různého typu. Inverze mezi dvěma elektronickými stavy umožňuje generovat ultrafialové nebo viditelné záření [1].

3.3.3.1 Vodíkový laser

Pro generaci ultrafialového záření v oblasti vlnových délek 140 až 165 nm (tzv. Lymanův pás) a 100 až 120 nm (tzv. Wernerův pás) jsou používány elektronové kvantové přechody v molekulárním vodíku [1]. V souvislosti s velmi krátkými, nanosekundovými, dobami života na hladinách je potřeba budit prostředí velmi intenzivně po velmi krátkou dobu. Buzení se provádí elektrickým výbojem v plynu, přičemž proudový impulz má velmi strmý náběh.

Typické hodnoty napětí budícího elektrického zdroje jsou 80 kV, špičkový proud 100 kA. Tlak plynu ve výbojovém prostoru bývá 2,6 až 5,3 kPa. Doba trvání výstupního laserového impulzu bývá přibližně 1 ns, výstupní špičkový výkon 1 MW, vlnová délka 116,1 nm. Laser pracuje zpravidla v tzv. režimu zesílené spontánní emise (tj. bez zrcadel tvořících optický rezonátor) [1].

3.3.3.2 Dusíkový laser

Aktivním prostředím tohoto laseru je molekulární dusík. Laser může generovat záření ve třech oblastech optického spektra [1]:

- ultrafialové záření (337 až 328 nm),
- viditelné a blízké infračervené (754 až 1235 nm),
- infračervené (3,29 až 8,21 μm).

Z uvedených spekter se nejvíce dusíkový laser uplatňuje jako generátor ultrafialového záření s vlnovou délkou 337,1 nm, pracuje v pulzním provozu a vysílá impulzy se špičkovým výkonem 100 kW až 1 MW s dobou trvání 5 až 10 ns [1].

3.3.3.3 Excimerové lasery

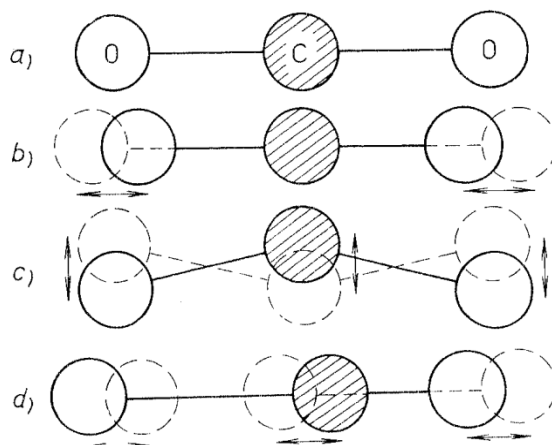
Excimer je nestabilní molekula, vznikající jen na přechodnou dobu v důsledku vzájemného působení vzbuzeného atomu (popř. vzbuzené molekuly) s atomem (popř. molekulou) v základním stavu. Tato molekula nevzniká, jsou-li oba atomy (molekuly) v základním stavu. Přejde-li excimerová molekula do základního stavu, např. vyzářením fotonu, nastává rychlá disociace (v časovém interval 10^{-14} s). Termín excimer se používá pro označení molekuly vytvořené ze dvou stejných atomů (popř. molekul) jako zkratka od excitovaný dimer [1].

Aktivním prostředím excimerových laserů jsou excimery, jejich buzení je zásadně pulzní. Excimery bývají vytvářeny v plynném prostředí buď elektrickým výbojem nebo svazkem rychlých elektronů.

Buzení elektronovým svazkem je obecně účinnější než buzení elektronovým výbojem, účinnost je asi 10 %. Účinnost při buzení elektrickým výbojem nepřesahuje 1 %, je však konstrukčně jednodušší a vhodné pro lasery s menší výstupní energií. Konstrukční řešení bývá podobné jako u příčně buzených CO_2 laserů.

3.3.3.4 CO_2 laser

Aktivními molekulami jsou molekuly oxidu uhličitého. Ke stimulované emisi dochází při kvantových přechodech mezi různými vibračně-rotacími podhladinami základního elektronického stavu molekuly. Kmitavý pohyb atomů v molekule může být rozložen do tří nezávislých módů.

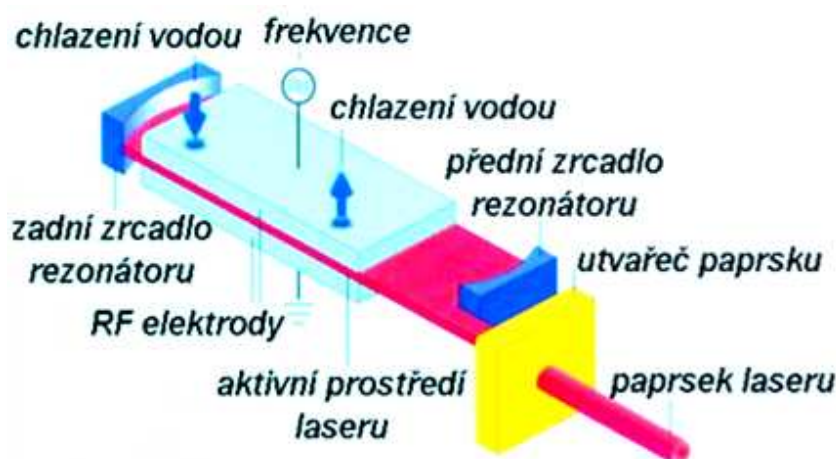


Obr. 14 Molekula CO_2 a její kmitavé módy [1]

a) molekula, b) symetrický vibrační mód, c) ohybový mód, d) asymetrický mód

Excitace vibračních stavů molekul CO_2 se uskutečňuje nejčastěji v doutnavém elektrickém výboji a to prostřednictvím nepružných srážek molekul CO_2 s elektrony nebo jinými molekulami. Elektrický výboj se zapaluje ve směsi plynů CO_2 , N_2 , He [1].

Při těchto procesech vzniká v systému značné teplo, které je z něj odváděno chladicím médiem (nejčastěji vodou), pomocí chladicího agregátu. Chlazení musí být účinné, teplota musí být nižší než 400 K. Plyn CO_2 procházející trubicí se časem znehodnocuje, částečně se rozpadá na CO a O_2 , čímž dochází k poklesu výkonu laseru [6].



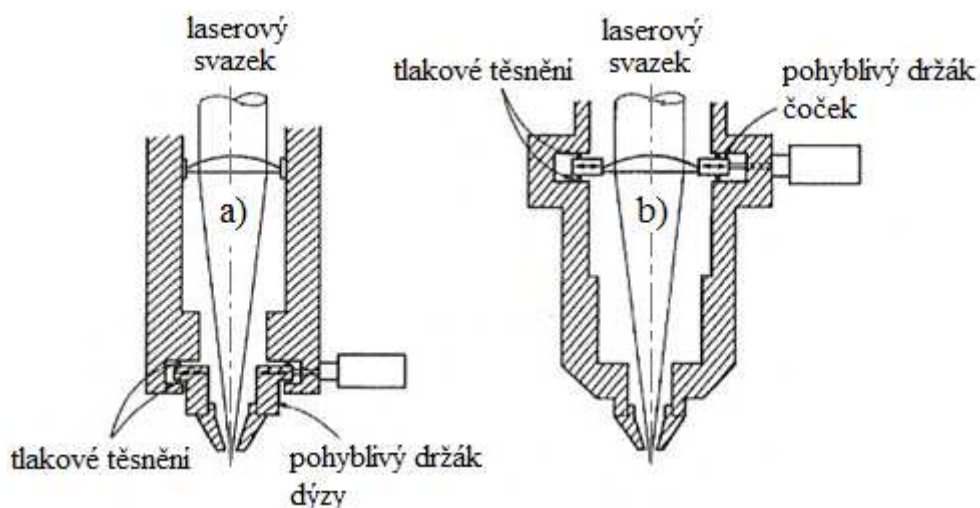
Obr. 15 Princip CO_2 laseru [5]

Generovaný laserový svazek vystupuje z rezonátoru polopropustným zrcadlem a do laserové hlavice je přiváděn systémem zrcadel. V hlavici se nachází fokusační čočka. Čočka je chlazená chladicím prstencem. Do laserové hlavice se zavádí pomocný plyn, který z ní vystupuje spolu s fokusovaným svazkem.

Pomocný plyn plní především tyto funkce [6]:

- chrání optiku před produkty, které vznikají při rozkladu materiálu opracovávaného laserem,
- může vytvářet v místě dopadu laserového svazku na materiál ochrannou nebo naopak oxidační, či jinak vhodně agresivní atmosféru,
- přispívá k čistějšímu a rychlejšímu průběhu opracování materiálu tím, že odstraňuje z obráběného materiálu ohřevem vznikající taveninu a páry.

Při laserovém řezání se využívá laserová hlavice, jejímž hlavním účelem je přivádět pomocný plyn do zóny řezání. Hlavice může mít různou konstrukci podle uspořádání a uložení dýzy pro přívod stlačeného plynu.



Obr. 16 Základní uspořádání mechanismu dýzy [6]

a) pohyblivá dýza, b) pohyblivé čočky

CO₂ lasery mají poměrně vysokou účinnost (přibližně 10 %) a jsou široce využívány. Bylo vyvinuto a průmyslově se vyrábí mnoho variant těchto laserů. Nízkovýkonové typy se vyznačují malými rozměry a velkou životností, jejich výkon se pohybuje v rozmezí od 1 mW do 10 W. Moderním nízkovýkonovým laserem je tzv. vlnovodový laser. Výkony zařízení desítky až stovky wattů je možné získat z dlouhých, vodou chlazených, trubíc, ve kterých proudí plyn podél osy trubice. Bývají označovány jako lasery s podélným buzením nebo podélným průtokem plynu.

3.3.3.5 CO laser

Aktivním prostředím CO laseru jsou molekuly oxidu uhelnatého. CO lasery vyzařují infračervené záření v pásmu 5 až 6,5 μm a vyznačují se, podobně jako CO₂ lasery, dobrou účinností a velkými výstupními výkony [1].

Buzení CO laserů se provádí obdobnými metodami jako u CO₂ laserů, tj. elektrickým výbojem, elektronovým svazkem, chemickou reakcí, dynamickým ochlazením plynu apod. Laser je možné provozovat jak v kontinuálním tak v pulzním režimu.

U CO laserů, kde nejsou kladeny nároky na spektrální čistotu výstupního svazku, dosahujeme účinnosti až 50%. Většímu rozšíření těchto laserů brání jedovatost CO [1].

Tab.1 Plynové lasery [1]

Typ	Aktivní prostředí	Vlnová délka λ [μm]	Buzení	Režim
Atomární	<i>Cu</i> páry (<i>He</i>) <i>Ne</i>	0,510 0,633 1,150 3,390	el. výboj el. výboj	impulzní kontinuální
	<i>I</i>	1,315	fotodisociace např.: CF_3I	impulzní
Iontový	(<i>He</i>) Cd^+	0,442 0,325	el. výboj	kontinuální
	Ar^+	0,488 0,514	el. výboj	kontinuální
Molekulární elektronový přechod	H_2	0,116	el. výboj	impulzní
	N_2	0,337	el. výboj	impulzní
Excimerový svazek	<i>ArF</i>	0,193	el. výboj	impulzní
	<i>KrF</i>	0,249	svazek elektronů	"
	<i>XeCl</i>	0,308	"	"
vibrační přechod	<i>HF</i>	2,7	chemické	kontinuální
	<i>CO</i>	5,5	el. výboj	impulzní
	CO_2	10,6	el. výboj chem. reakce expanze plynu	" "
Rotační přechod	H_2O <i>HCN</i>	118,6 a 220,2 331,0 a 337,0	rezonanční optické	impulzní

3.4 Plazmatické lasery

V plazmatickém laseru je inverze populace hladin vytvářena uvnitř chladnoucího plazmatu. Experimentálně bylo realizováno mnoho plazmatických laserů s rozsáhlým spektrem vlnových délek výstupního záření.

Nejvyšší součinitel zisku byl pozorován při laserových přechodech v rozpadajícím se plazmatu elektrického výboje u těchto iontů [1]:

- argonu, s vlnovou délkou 747 nm,
- kadmia, s vlnovou délkou 537,8 nm,
- rtuťi, s vlnovou délkou 567 nm.

Obecně plazma nemusí být vytvářeno elektrickým výbojem, ale i jinými způsoby, např.: (silnoproudým) elektronovým svazkem, produkty jaderných reakcí, chemickými reakcemi nebo fokusovaným laserovým zářením. Plazmatické lasery s aktivním prostředím vytvořeným mnohonásobně nabitými ionty jsou jednou z cest k vytvoření rentgenového laseru [1].

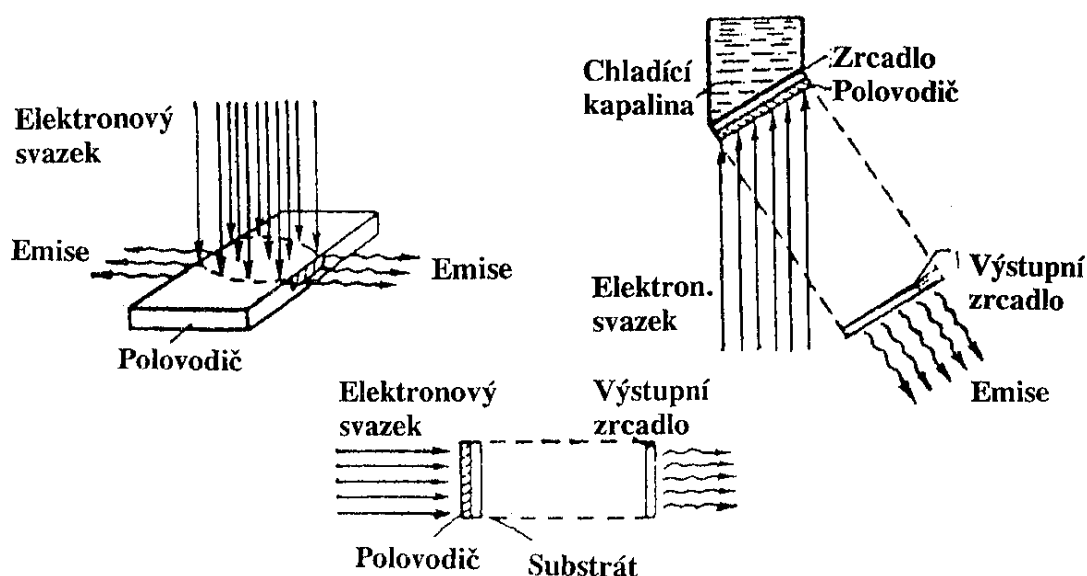
3.5 Polovodičový laser

Funkce těchto laserů je založena na vzniku stimulované emise záření v aktivním polovodičovém materiálu. Na rozdíl od ostatních druhů laserů se děje přechod elektronů mezi dovolenými energetickými pásy a ne mezi energetickými hladinami.

Jako laserové médium se používá [3]:

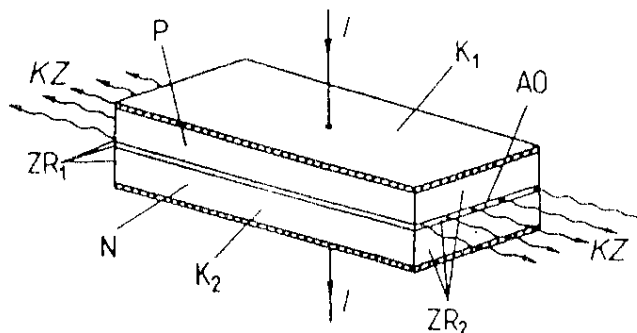
- galium arsenid (GaAs),
- kadmium sulfid (CdS),
- kadmium selen (CdSe).

Buzení je realizováno fotony, svazkem elektronů nebo elektrickým polem.



Obr. 17 Polovodičové lasery buzené elektronovým svazkem [1]

Rezonátor je tvořen vybroušenými stranami polovodičového materiálu a musí být vydatně chlazen, je možné získat koherentní záření o jakékoli vlnové délce od $0,3 \mu\text{m}$ do $30 \mu\text{m}$. Výstupní výkon lze dosáhnout až 2 kW. Účinnost je řádově desítky procent, může být dosaženo až 50 % (dle použitého polovodiče).



Obr. 18 Schematické spořádání polovodičového laseru [1]

N – polovodič s vodivostí N; P – polovodič s vodivostí P; $K_{1,2}$ - kontakty; I – protékající proud; AO – aktivní oblast; KZ – koherentní záření; $ZR_{1,2}$ – rovinné čelní plochy s opticky lesklým povrchem

Hlavní předností polovodičových laserů jsou jejich kompaktnost, malé rozměry a vysoká účinnost.

4 Aplikace laserové technologie

Laser se za dobu svého vzniku uplatnil v mnoha oborech a neustále se stává velkým příslibem do budoucna. Zde uvedené aplikace laseru jsou ty nejpodstatnější, především v průmyslovém odvětví.

4.1 Řezání a dělení materiálu

První myšlenka řezání světelným paprskem se nejspíše zrodila v okamžiku, kdy se za slunného dne podařilo pomocí lupy zapálit papír. Řezání desítky milimetrů silného ocelového plechu, jak je tomu možné v současnosti, se pak v té době muselo zdát ještě více fascinující [10].

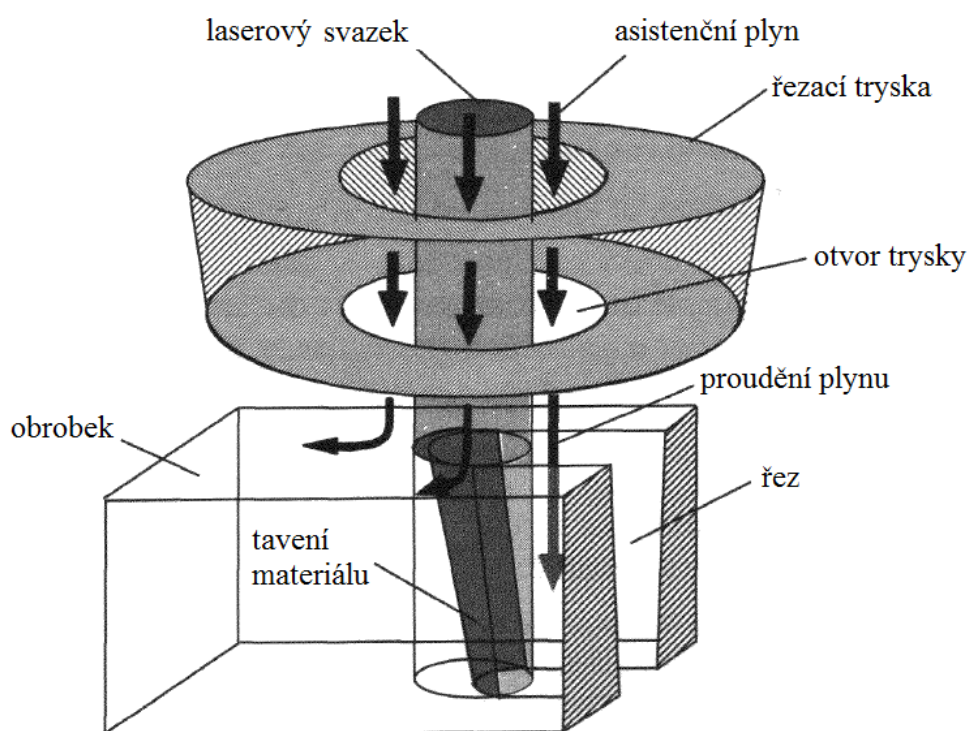
Nejpoužívanější lasery v této oblasti jsou kontinuální CO₂ lasery se středním výkonem do 15 kW. Pro přesnější řezy s menší šířkou řezné spáry se používají Nd:YAG lasery o výkonu 100 až 1 000 W.

Řezání může být [9]:

- **sublimační** - materiál je odstraňován převážně odpařováním v důsledku vysoké intenzity záření laseru v místě řezu;
- **tavné** - materiál je v místě řezu působením svazku laseru roztaven a asistenčním plynem odfukován. Tímto způsobem jsou řezány nekovové materiály, jako jsou keramika, plasty, dřevo, textilní materiály, papír a sklo;
- **pálením** - svazek laseru ohřeje materiál na zápalnou teplotu tak, že pak může s přiváděným reaktivním plynem (např. kyslíkem) shořet v exotermické reakci, vzniklá struska je z místa řezu odstraňována asistenčním plynem. Tímto způsobem lze řezat např. titan, ocele s nízkým obsahem uhlíku a korozivzdorné ocele.

Základními charakteristikami procesu řezání laserem jsou:

- rychlost řezání - závisí na způsobu řezání, výstupním výkonu paprsku laseru, požadované kvalitě řezu, tloušťce a druhu řezaného materiálu,
- kvalita řezu - hodnotí se podle jakosti řezané plochy,
- šířka řezné spáry - je dána druhem laseru, druhem a tloušťkou řezaného.



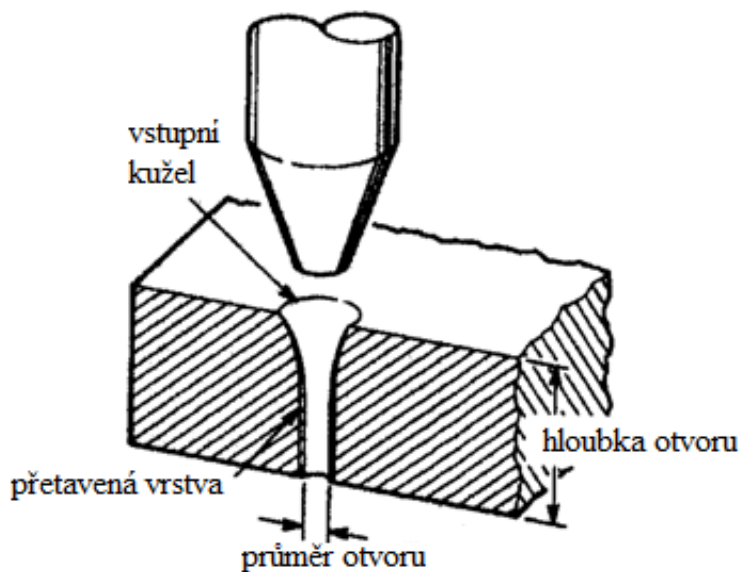
Obr. 19 Princip metody řezání laserem [11]

Výhody řezání laserem:

- malá šířka řezu,
- malá velikost tepelně ovlivněné oblasti,
- žádné opotřebení nástroje,
- čisté řezy,
- možnost řezání složitých tvarů,
- hospodárnost i při malých výrobních sériích.

4.2 Vrtání

Při vrtání ohřívá laserový svazek povrch materiálu rychlostí $1010\text{ }^{\circ}\text{C/s}$, materiál se odpaří a umožní průnik paprsku hlouběji do povrchu. Na vrtání otvorů se používá svazek v kontinuálním, ale i pulzním režimu. Z hlediska tepelně ovlivněné zóny je vrtání otvorů v pulzním režimu výhodnější, jelikož ovlivněná zóna je menší než při režimu kontinuálním [6].

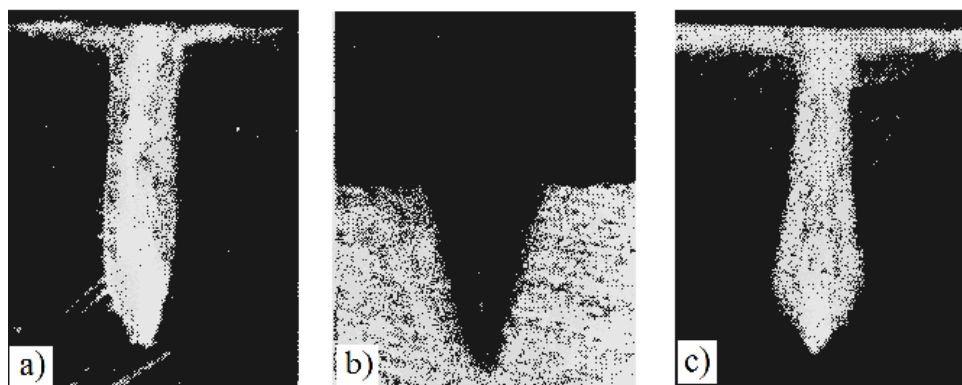


Obr. 20 Typický tvar otvoru při vrtání laserem [6]

Pro vrtání se používají [9]:

- CO₂ lasery - vyřezávání (kruhových i tvarových) otvorů; nejmenší průměr vyřezávaného otvoru je 5 mm, nejmenší průměr vrtané díry je 0,2 mm;
- Nd:YAG lasery - vrtání děr o menším průměru; nejmenší průměr vrtané díry je 0,025 mm;
- excimerové lasery - vrtání děr do keramiky.

Rozměry vyvrtaných otvorů, obzvlášť průměr a hloubka, závisí na činitelích, svázaných s vlastnostmi obráběného materiálu a s laserovým zářením vyvolávajícím efekt eroze [12].



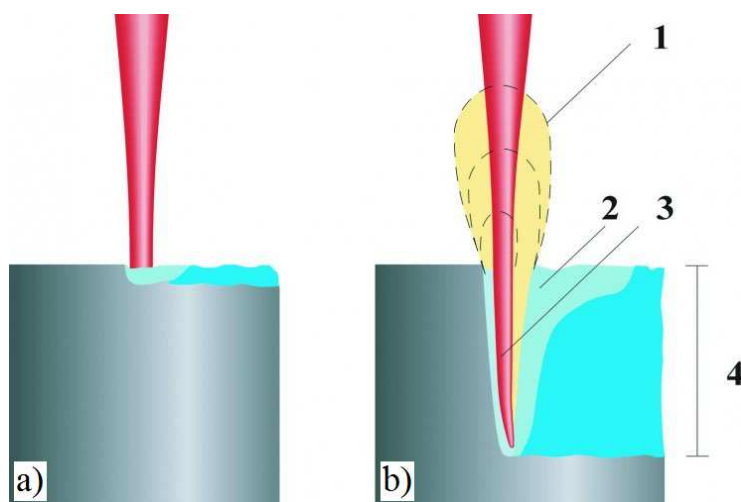
Obr. 21 Skutečné podélné profily vyvrtaných otvorů [12]

a) válcový otvor, b) kuželový otvor, c) sudový otvor

V průmyslu se pro vrtání děr používají především Nd:YAG lasery o výstupním výkonu 100 až 500 W. Doba vrtání závisí na výstupním výkonu laseru a na tloušťce vrtaného materiálu.

4.3 Svařování

Svařování laserem má řadu výhod, kterých nelze dosáhnout žádnou jinou technikou. Mezi výhody svařování laserem patří vysoká rychlost svařování, malé tepelné ovlivnění místa svaru, možnost provedení svaru i při přístupu pouze z jedné strany, malé nároky na jakostní povrch svařovaných součástí, vysoká pevnost svaru. Laserem je možné svařovat jinými metodami obtížně svařitelné materiály, jako titan a jeho slitiny, hliníkové slitiny (např. dnes v letectví a kosmonautice používanou slitinu hliníku a lithia), sendvičových hliníkových konstrukcí, niob, zlato apod. [5].



Obr. 22 Porovnání svařování: a) vedením tepla; b) hlubokého svaru (keyhole) [13]

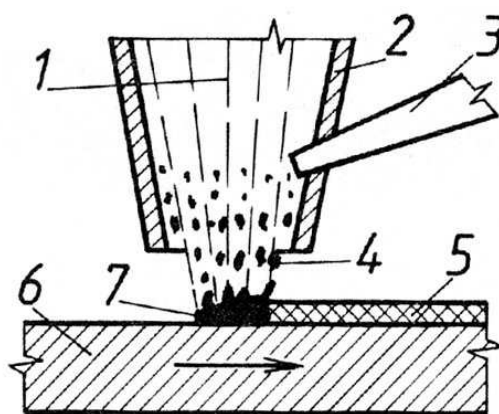
1 - plazma, 2 - roztavený materiál, 3 - lokální díra (keyhole), 4 - hloubka průvaru

- vedením tepla - vzniklá tepelná energie se v materiálu šíří vedením, svary jsou široké a ploché;
- hloubkové - při překročení určité intenzity přívodu tepla pronikne svazek hluboko do materiálu, ten se roztaví a částečně odpaří, svary jsou úzké a hluboké.

Ke svařování se používají Nd:YAG, CO₂ i diodové lasery. Svařování ve srovnání s dalšími aplikacemi vyžaduje menší intenzitu záření optického svazku a větší délku laserového pulzu. Při svařování laserem se nepoužívá žádný přídavný materiál [9].

4.4 Nanášení povlaků

Nanášený materiál (kovy, keramika apod.) je přiváděn do paprsku laseru ve formě prášku nebo drátu. Zde je roztaven a nanáší se na povrch součásti, kde ztuhne. Tímto procesem vznikají pásy naneseného materiálu, které se vzájemně překrývají. Povlak může být vytvořen též reakcí nataveného materiálu s plynem, který je přiváděn do místa ohřevu nebo může být na povrch obrobku předem nanesen vhodný materiál (tvořící povlak) a následně svazkem laseru roztaven. Povlak nanesený touto technologií může mít tloušťku až 1 mm [9].



Obr. 23 Princip nanášení povlaků laserem [9]

1 – laserový svazek, 2 - pracovní hlava, 3 - přívod nanášeného materiálu, 4 - roztavený nanášený materiál, 5 - nanášený materiál, 6 - obrobek, 7 - tavenina

Povlak vytvořený laserem má dobrou přilnavost k povrchu obrobku a nemá žádné trhliny. Výhodou je možnost nanášení na různé materiály, a to i na velmi tvarově složité součásti. Používají se především CO₂ lasery o výkonu 5 kW, rychlost nanášení je 20 až 100 cm².min⁻¹ [9].

4.5 Ostatní oblasti využití

Za dobu od svého vzniku se laser uplatnil a stále více uplatňuje v celé řadě oborů, především pak v následujících:

4.5.1 Lasery v medicíně

Zájem lékařů, v mnoha odvětvích medicíny, je pochopitelný a plyne z unikátních vlastností laserového záření, které umožňuje oproti původním zdrojům světla lepší přesnost zásahu a větší účinek. V roce 1949 byla provedena první úspěšná operace s využitím laseru. K těmto účelům se používá celá řada laserů, především pak laser argonový a Nd:YAG pulzní laser. Ve stádiu zkoušek je využití laseru excimerového.

4.5.2 Další laserové technologie uplatňované v průmyslu

Nově vzniklé odvětví tzv. laserovou technologií lze definovat jako opracování materiálu založené: 1. na využití schopnosti laseru koncentrovat optickou energii v prostoru, čase a spektrálním intervalu a 2. na interakci optického záření s látkou [1].

Do těchto technologií se řadí i již zmíněné a popsané laserové – řezání, vrtání, svařování a nanášení povlaků, což jsou dle mého názoru nejvíce využívané laserové technologie dnešní doby.

Mezi další oblasti, ve kterých se uplatňuje laser v průmyslu, patří [5]:

- obrábění - řezání drážek, obrábění dutin, obrábění s předeřevem, popisování, dělení třísek, odhrotování, soustružení, frézování a mikrofrézování;
- tepelné zpracování - kalení, žíhání, popouštění, zpevnění s natavením;
- povrchové úpravy - leštění povrchů, vytváření textur;
- měření - délek, tvaru, polohy obrobku, měření jakosti povrchu;
- renovace opotřebovaných součástí a nástrojů;
- vyvažování součástí - úběr materiálu součásti v předem daném místě;
- měření stavu napjatosti součástí - holografie;
- dálkové řízení strojů;
- měření stavu opotřebení činné části nástroje;
- vytváření dekorací na a ve skleněných předmětech.

4.5.3 Lasery v mikroelektronice

- laserové doladování (změna hodnoty elektrického odporu pasivních součástek elektronických obvodů, pomocí korigující drážky vyřezané v jejich povrchové vrstvě),
- laserové rýhování (zejména v mikroelektronice pro dosažení snadného a definovaného dělení základního substrátu integrovaných obvodů),
- laserové žíhání (rekrytalizace krystalické mřížky substrátu poškozených mikroelektronických obvodů při iontové implantaci),
- laserová litografie (přenesení půdorysné struktury součástky nebo obvodu na jiný podklad) [1].

4.5.4 Lasery v astronomii, geodézii a geofyzice

Laser je zde využíván v systému radaru jako vysílač záření. S jeho pomocí pak můžeme měřit vzdálenosti objektů, které odrážejí laserové záření zpět. Používány jsou lasery impulzní pevnolátkové (rubínové a Nd:YAG) a helium-neonové lasery.

4.5.5 Lasery ve výpočetní technice

Po tuto aplikaci se využívají, z důvodu malých rozměrů, především polovodičové lasery. Jako nejznámější využití laseru v této oblasti můžeme uvést, dnes každému známou, laserovou tiskárnu. Zařízení používající laserového záření k vytvoření obrazce, který má být tištěn [1].

Využití laseru je v dnešní době tak rozsáhlé, že by to vydalo na samostatnou práci. To ovšem není předmětem této práce, jejím úkolem (této kapitoly) je nastínit jeho nejznámější a nejrozšířenější uplatňování. Nemohou být tedy obsáhnuty všechny známé aplikace laseru.

5 Experimentální část

Experimentální část je definovaná potřebami zadavatele, jímž je Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o.

Hlavním úkolem této části práce, zabývající se laserovým řezáním slitin určených pro aplikace v leteckém průmyslu, bylo optimalizovat řezné parametry laseru. V závislosti na nich, typu a geometrii obráběného materiálu a dalších faktorech majících vliv na výsledný řez, byla snaha o dosažení přijatelného řezu slitinou, splňující požadované kvalitativní parametry.

Pro realizaci experimentálních prací nám byl k našim potřebám poskytnut materiál Haynes 718, který je blíže specifikován v kapitole 5.2. Vzorky byly vytvořeny z plechů o třech různých tloušťkách, a sice 2,5 mm, 3,2 mm a 5,0 mm. Tento typ materiálu a jeho tloušťky byly vybrány záměrně, z důvodu jeho využívání přímo ve výrobě.

5.1 Zařízení, využité při realizaci experimentu

Veškeré úkony experimentu, související s obráběním slitiny, byly realizovány na laserovém systému Winbro Delta, doplněným o zdroj Rofin DC 020 a vybaveným řídicím systémem Heidenhain iTNC 530. Součástí systému je také chladicí zařízení, kde je jako chladicí médium používána demineralizovaná voda.

5.1.1 Laserový stroj Winbro Delta

Laserový stroj Winbro Delta je navržen tak, aby pojal velké součásti, v průměru až 1900 mm, 500 mm na výšku a hmotnosti až 500 kg. Systém Delta lze nakonfigurovat až se čtyřmi různými typy laserových zdrojů tak, aby byly splněny požadavky pro konkrétní aplikace laserové technologie v provozu (např. řezání, vrtání, svařování) [15].

Vybrané funkce a možnosti stroje [15]:

- Heidenhain řídicí systém a PC řídicí systém,
- kontaktní sondování,
- kapacitní snímání výšky,
- rychlá změna systému trysky,

- havarijní systém ochrany,
- možnost integrace CAM softwaru,
- 3D řezání rozmanitých součástí.



Obr. 24 Stroj Winbro Delta s řídicím systémem Heidenhain iTNC 530 [15]

5.1.2 Zdroj Rofin DC 020

Jedná se o plynový CO₂ laser, pracující v kontinuálním režimu. Je vhodný pro širokou škálu aplikací řezání, svařování a povrchových úprav. Procesní plyn je čerpán z plynové lahve, která je integrovaná přímo do boxu zdroje. Díky tomu se můžeme vyhnout problémům s přívodem plynů ke zdroji. Vyznačuje se také vynikající kvalitou svazku. Z praktických důvodů je zdroj umístěn přímo na laserovém stroji.

Technická data zdroje Rofin DC 020 [16]:

- výstupní výkon 2000 W,
- rozsah výkonů 200 až 2000 W,
- číselná charakteristika kvality svazku 0,95 [-].



Obr. 25 Zdroj Rofin DC 020 [16]

5.2 Obráběný materiál

Zkušební vzorky byly vyrobeny z vysokopevnostní slitiny Haynes 718, která se řadí ke skupině niklových slitin. Tyto jsou vhodné k provozu za extrémně náročných podmínek. Jedná se o materiály, odolné především vůči vysokým teplotám. Tyto slitiny nacházejí uplatnění při konstrukci pozemních plynových turbín a plynových turbín do leteckých motorů. Dále se uplatňují v průmyslových pecích, spalovacích komorách apod. Obrábění tohoto typu materiálu a podobných slitin na bázi niklu je vždy určitou výzvou. Na druhé straně je nutné říci, že tyto materiály jsou v současném průmyslu stále více používány.

Tab. 2 Chemické složení slitiny Haynes 718 [17]

Ni	Co	Fe	Cr	Cb+Ta	Mo	Mn	Si	Ti	Al	C	B	Cu
52	1*	19	18	5	3	0.35*	0.35*	0.9	0.5	0.05	0.009	0.1*

* Maximum

Pozn.: Hodnoty jsou uvedeny v hmotnostních procentech.

Slitina se vyznačuje vynikající odolností teplotám od -253 °C do +705 °C a také excelentní oxidační odolností až do 980 °C.

Pevnostní charakteristiky a podrobnější specifikace slitiny Haynes 718 jsou k nahlédnutí v příloze A.

5.3 Návrh experimentu

Z počátku bylo poněkud obtížné zvolit parametry řezání, ze kterých bychom mohli vyjít při jejich další optimalizaci. Jelikož za dobu provozu stroje, která čítala asi 1 rok, se na tomto obráběly pouze dílce z plechů menších tloušťek, než byly tloušťky materiálu námi testované. Zvolili jsme tedy postup, podložený empirickými znalostmi pracovníka obsluhující laserový stroj.

Začali jsme s plechem tloušťky 2,5 mm. Z informací od výrobce stroje jsme věděli, že bychom měli být schopni prořezat podobný typ materiálu o maximální tloušťce 6,0 mm. Zatím se však takto silný plech nikdy prořezat nezkoušel. Zvolili jsme tedy postup, kdy jsme ve zdrojových parametrech nastavili 90 % maximálního výkonu laseru, který v našem případě činí 2000 W. Vyšší hodnota, např. 100 %, by u této tloušťky plechu neměla smysl, jelikož jsme věděli, že plech pohodlně prořežeme i při námi nastavené hodnotě výkonu. Při vyšších hodnotách výkonu by byl plech také prořezán, ale patrně by již kvalita řezu nebyla přijatelná. Což se také následně potvrdilo, když i výkon 90 % byl na tuto tloušťku příliš. Rychlost řezání jsme odhadem nastavili na hodnotu $500 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Další nastavené hodnoty jsou vždy uvedeny v tabulkách parametrů řezání příslušných řezů a nejsou tak důležité, z hlediska průběhu řezného procesu, jako parametry výkon zdroje a rychlost řezání. Takto jsme vytvořili řez č. 1. Dále jsme postupovali obdobně, kdy všechny parametry nastavené pro řez č. 1 zůstaly konstantní, pouze se s každým dalším řezem snižoval výkon o 10 %. Takto jsme postupovali až do okamžiku, kdy se nám nepodařilo plech prořezat. Vznikly řezy č. 1 až č. 5. Při hodnotách nastavených pro řez č. 5 se ukázalo, že plech již není zcela prořezán. Proto jsme pro řez č. 6 nastavili výkon na hodnotu 55 %, tedy střední hodnotu výkonů řezů č. 4 a č. 5. Ukázalo se, že ani tento výkon nestačí k prořezání plechu. Nejmenším výkonem, použitelným pro tuto tloušťku materiálu, je tedy 60 % maximálního výkonu zdroje. To odpovídá 1200 W.

Všechny řezy byly zhotoveny v délce 10 mm. Jejich rozmístění, respektive vzdálenosti jednotlivých řezů mezi sebou, nebylo zvoleno podle pevného schématu. Bylo empiricky zvoleno tak, aby mezera mezi řezy byla dostatečná z hlediska případného vzájemného tepelného ovlivnění sousedních řezů.

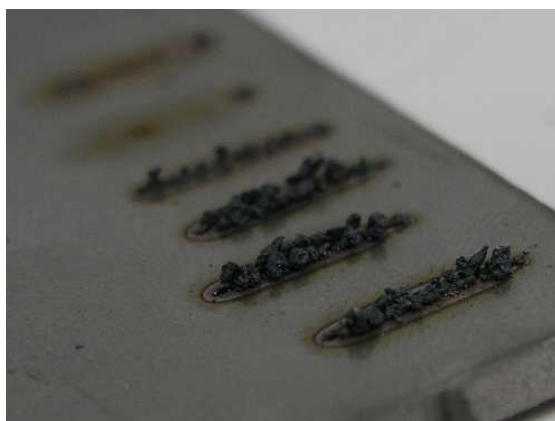
5.3.1 Vzorek č. I. – plech tloušťky 2,5 mm (slitina Haynes 718)



Obr. 26 Horní strana vzorku



Obr. 27 Spodní strana vzorku



Obr. 28 Detail řezů na spodní straně

Na obr. 26 vidíme řezy č. 1 až č. 6. Všechny řezy, mino řezů 5 a 6, prošly celou tloušťkou plechu. Příčinou neúspěšného prořezání posledních dvou řezů byl již nedostačující výkon zdroje laseru.

Na obr. 27 je patrná tepelně ovlivněná oblast řezu, která se s klesajícím výkonem postupně zmenšuje. Na spodní straně plechu vzniká napálená struska, což lze považovat za doprovodný jev procesu řezání a částečně jej můžeme ovlivnit nastavením parametrů řezání. Obecně lze říci, že výška vznikající strusky nepřesahuje hodnotu tloušťky řezaného plechu, je totiž křehká a láme se.

Tab. 3 Řezné parametry pro řez č. 1

Číslo řezu	Zdrojové parametry laseru	
1	výkon zdroje 2kW [%]:	90
	budicí frekvence [Hz]:	2000
	plnění [%]:	75
	Řídicí systém Haidenhain	
	rychlost řezání [mm.min ⁻¹]:	500
	vzdálenost trysky od povrchu [mm]:	0,9



Obr. 29 Řez č. 1 - detail

Tab. 4 Řezné parametry pro řez č. 2

Číslo řezu	Zdrojové parametry laseru	
2	výkon zdroje 2kW [%]:	80
	budicí frekvence [Hz]:	2000
	plnění [%]:	75
	Řídicí systém Haidenhain	
	rychlost řezání [mm.min ⁻¹]:	500
	vzdálenost trysky od povrchu [mm]:	0,9



Obr. 30 Řez č. 2 - detail

Tab. 5 Řezné parametry pro řez č. 3

Číslo řezu	Zdrojové parametry laseru	
3	výkon zdroje 2kW [%]:	70
	budicí frekvence [Hz]:	2000
	plnění [%]:	75
	Řídicí systém Haidenhain	
	rychlost řezání [mm.min ⁻¹]:	500
	vzdálenost trysky od povrchu [mm]:	0,9



Obr. 31 Řez č. 3 - detail

Tab. 6 Řezné parametry pro řez č. 4

Číslo řezu	Zdrojové parametry laseru	
4	výkon zdroje 2kW [%]:	60
	budicí frekvence [Hz]:	2000
	plnění [%]:	75
	Řídicí systém Haidenhain	
	rychlost řezání [mm.min ⁻¹]:	500
	vzdálenost trysky od povrchu [mm]:	0,9



Obr. 32 Řez č. 4 - detail

Tab. 7 Řezné parametry pro řez č. 5

Číslo řezu	Zdrojové parametry laseru	
5	výkon zdroje 2kW [%]:	50
	budicí frekvence [Hz]:	2000
	plnění [%]:	75
	Řídicí systém Haidenhain	
	rychlost řezání [mm.min ⁻¹]:	500
	vzdálenost trysky od povrchu [mm]:	0,9



Obr. 33 Řez č. 5 - detail

Tab. 8 Řezné parametry pro řez č. 6

Číslo řezu	Zdrojové parametry laseru	
6	výkon zdroje 2kW [%]:	55
	budicí frekvence [Hz]:	2000
	plnění [%]:	75
	Řídicí systém Haidenhain	
	rychlost řezání [mm.min ⁻¹]:	500
	vzdálenost trysky od povrchu [mm]:	0,9



Obr. 34 Řez č. 6 - detail

Na obr. 29 až obr. 32 vidíme, že v místě zápalu, což je místo prvního kontaktu laserového svazku s obráběným materiálem, dochází k rozstříku roztaveného materiálu. Má se za to, že oblast rozstříku se zvětšuje s rostoucím výkonem zdroje laseru. To můžeme vidět, jestliže porovnáme zápaly řezů č. 1 a č. 4, kde rozdíl použitých výkonů činí 30 % celkového výkonu zdroje. Tedy 600 W. Na vznik zápalu má také vliv budicí frekvence laserového zdroje. Nerovnoměrné rozložení taveniny může mít souvislost s prouděním procesního plynu z trysky.

Umístění zápalu, počátku řezu, má svá pravidla. Musíme mít na paměti, kam jej umístit při vyřezávání různých otvorů v obráběném dílci. Z hlediska kvality řezu a dodržení výrobních tolerancí nesmíme zápal umístit přímo do kontury řezu. Pokud chceme na dílci vyříznout například tvar kolečka, umístíme zápal uvnitř vyřezávaného tvaru, který se následně stává odpadem. Naopak, pokud je naším cílem vyříznout tvar, jakožto finální výrobek, umístíme zápal vně.

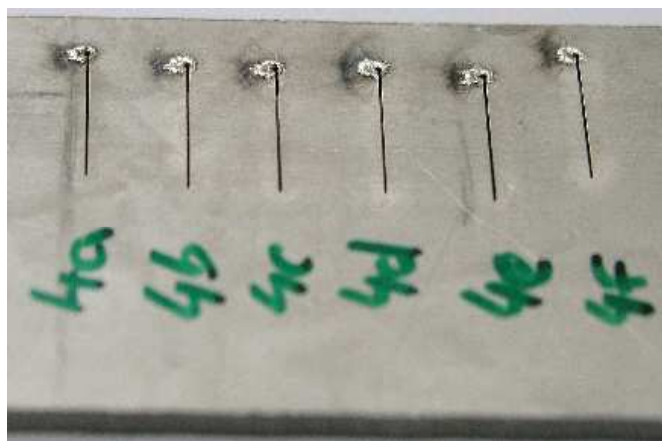
Na řezech č. 5 a č. 6 vidíme (obr. 33 a obr. 34), že nedošlo k úplnému prořezání plné tloušťky plechu. Díky nedostatečnému výkonu byl jeho povrch pouze narušen. Takový výsledek je pro nás nepřijatelný.

Vzniklé řezy se vizuálně překontrolovaly a byl vybrán ten, který vykazoval nejlepší kvalitativní parametry. Těmi byly čistota řezu a velikost strusky vznikající na spodní straně plechu. Toto nejlépe splňoval řez č. 4 (obr. 32).

Optimální výkon pro tuto tloušťku plechu, 1200 W, jsme tedy našli. Proto jsme pokračovali dále s hledáním nejvhodnější rychlosti řezání pomocí řezů č. 4a až č. 4f, čímž jsme mohli kvalitu řezu ještě zvýšit. Zdrojové parametry jsme nastavili na hodnoty řezu č. 4, ty zůstaly konstantní, a měnili jsme pouze hodnoty rychlosti řezání. S každým dalším řezem jsme je zvyšovali o $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Jako řezy, vyznačující se nejlepší kvalitou, jsme vyhodnotili řezy č. 4c a č. 4d. Tyto odpovídají intervalu rychlosti řezání $<700;800> \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Proto jsme pro řez č. 4f tento interval zpřesnili na hodnotu $750 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$.

Tab. 9 Rychlosti řezání příslušející řezům při výkonu 60 %

Číslo řezu	Rychlost řezání [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]
4a	500
4b	600
4c	700
4d	800
4e	900
4f	750



Obr. 35 Optimalizace rychlosti řezání při konstantním výkonu 60 %

V průběhu optimalizace rychlosti řezání se zpravidla řeší kompromis, zda je pro nás důležitější čistota řezu nebo množství napálené strusky. Ta se totiž následně musí ze zhotovených dílců odstraňovat ručně, což se negativně projeví na výrobních časech a konečné ceně výrobku.

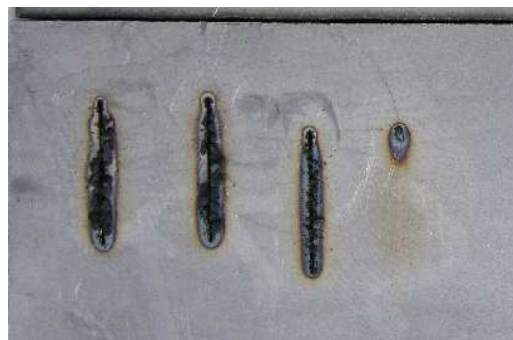
Má se za to, že čím vyšší rychlost řezání je, tím lepší bude čistota řezu. Ovšem otřep (napálená struska) na spodní straně plechu bude větší, a naopak. Velikost či množství strusky pro nás však není hodnotícím parametrem.

Můžeme tedy konstatovat, že pro tento typ slitiny a tuto tloušťku plechu se zdají být optimální parametry řezání odpovídající těm, pomocí kterých byl vytvořen řez č. 4f. Tzn. výkon 1200 W, rychlost řezání $750 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$.

5.3.2 Vzorek č. II. – plech tloušťky 3,2 mm (slitina Haynes 718)



Obr. 36 Horní strana vzorku



Obr. 37 Spodní strana vzorku



Obr. 38 Detail řezů na spodní straně

Jako další, jsme se zaměřili na plech tloušťky 3,2 mm. Postupovali jsme stejně, jako u předešlého vzorku. Počáteční hodnoty řezných parametrů byly nastaveny tak, jako u řezu č. 1 a postupovali jsme až do okamžiku, kdy se nám nepodařilo plech prořezat. Výkon zdroje 90 % maximálního výkonu, rychlost řezání $500 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Poté se s každým dalším řezem snižoval výkon o 10 %. Všechny řezy byly zhotoveny v délce 10 mm. Vznikly řezy č. 7 až č. 10. Při hodnotách nastavených pro řez č. 10 se ukázalo, že plech již není zcela prořezán. Nejmenším výkonem, použitelným pro tuto tloušťku materiálu, je tedy 70 % maximálního výkonu zdroje. To odpovídá 1400 W.

Na obr. 36 vidíme řezy č. 7 až č. 10. Všechny řezy, mino řezu 10, prošly celou tloušťkou plechu. Příčinou neúspěšného prořezání posledních dvou řezů byl, stejně jako u vzorku č. I., již nedostačující výkon zdroje laseru.

Tab. 10 Řezné parametry pro řez č. 7

Číslo řezu	Zdrojové parametry laseru	
7	výkon zdroje 2kW [%]:	90
	budicí frekvence [Hz]:	2000
	plnění [%]:	75
	Řídicí systém Haidenhain	
	rychlost řezání [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]:	500
	vzdálenost trysky od povrchu [mm]:	0,9



Obr. 39 Řez č. 7 - detail

Tab. 11 Řezné parametry pro řez č. 8

Číslo řezu	Zdrojové parametry laseru	
8	výkon zdroje 2kW [%]:	80
	budicí frekvence [Hz]:	2000
	plnění [%]:	75
	Řídicí systém Haidenhain	
	rychlost řezání [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]:	500
	vzdálenost trysky od povrchu [mm]:	0,9



Obr. 40 Řez č. 8 - detail

Tab. 12 Řezné parametry pro řez č. 9

Číslo řezu	Zdrojové parametry laseru	
9	výkon zdroje 2kW [%]:	70
	budicí frekvence [Hz]:	2000
	plnění [%]:	75
	Řídicí systém Haidenhain	
	rychlost řezání [mm.min ⁻¹]:	500
	vzdálenost trysky od povrchu [mm]:	0,9



Obr. 41 Řez č. 9 - detail

Tab. 13 Řezné parametry pro řez č. 10

Číslo řezu	Zdrojové parametry laseru	
10	výkon zdroje 2kW [%]:	60
	budicí frekvence [Hz]:	2000
	plnění [%]:	75
	Řídicí systém Haidenhain	
	rychlost řezání [mm.min ⁻¹]:	500
	vzdálenost trysky od povrchu [mm]:	0,9



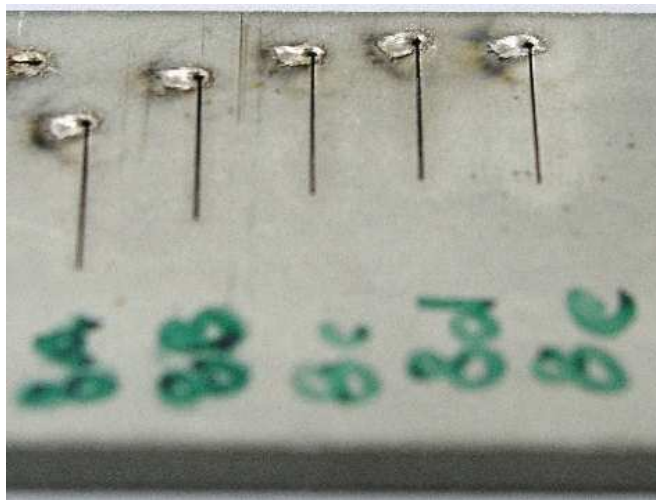
Obr. 42 Řez č. 10 - detail

Vzniklé řezy byly opět vizuálně překontrolovány a jako nejkvalitnější, z hlediska čistoty řezu a velikost strusky na spodní straně plechu, byl vybrán řez č. 8 (obr. 40).

Optimální výkon pro tuto tloušťku plechu, 1600 W, jsme našli. Pokračovali jsme dále s hledáním nejvhodnější rychlosti řezání pomocí řezů č. 8a až č. 8e, čímž jsme mohli kvalitu řezu ještě zvýšit. Zdrojové parametry jsme nastavili na hodnoty řezu č. 8, ty zůstaly konstantní, a měnili jsme pouze hodnoty rychlosti řezání. Nejprve jsme u řezu č. 8b rychlost řezání o 100 mm.min⁻¹ zvýšili na hodnotu 600 mm.min⁻¹. To se však na kvalitě řezu projevilo negativně. Proto jsme v dalším postupu rychlost řezání snižovali. Hodnota 300 mm.min⁻¹ se ukázala jako mezní, nejmenší možná. Jako řezy, vyznačující se nejlepší kvalitou, jsme vyhodnotili řezy č. 8a a č. 8c. Tyto odpovídají intervalu rychlosti řezání <400;500> mm.min⁻¹. Proto jsme pro řez č. 8e tento interval zpřesnili na hodnotu 450 mm.min⁻¹.

Tab. 14 Rychlosti řezání příslušející řezům při výkonu 80 %

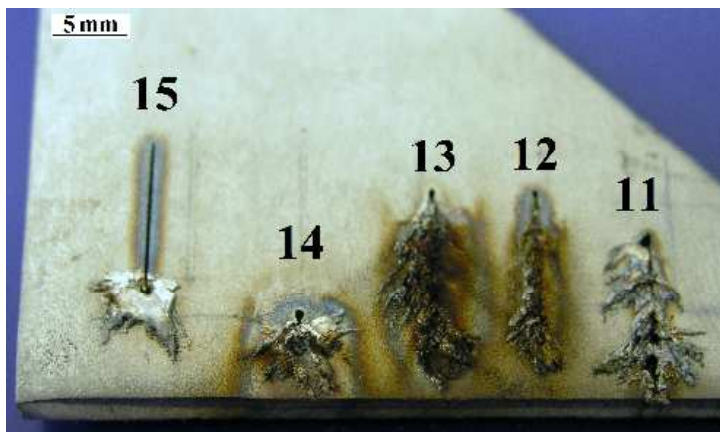
Číslo řezu	Rychlost řezání [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]
8a	500
8b	600
8c	400
8d	300
8e	450



Obr. 43 Optimalizace rychlosti řezání při konstantním výkonu 80 %

Můžeme tedy konstatovat, že pro tento typ slitiny a tuto tloušťku plechu se zdají být optimální parametry řezání odpovídající těm, pomocí kterých byl vytvořen řez č. 8e. Tzn. výkon 1600 W, rychlost řezání $450 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$.

5.3.3 Vzorek č. III. – plech tloušťky 5,0 mm (slitina Haynes 718)



Obr. 44 Horní strana vzorku



Obr. 45 Spodní strana vzorku

Plech o tloušťce 5,0 mm byl posledním testovaným. U takto velké tloušťky plechu jsme očekávali možné potíže s jeho prořezáním. To se potvrdilo hned u prvního řezu č. 11 na tomto vzorku. Při počáteční hodnotě výkonu 80 % a rychlosti řezání $500 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ došlo jen k narušení povrchu vzorku, zcela prořezán ovšem zdaleka nebyl. Musel se tedy zvýšit výkon a razantně snížit rychlost řezání. Jak je vidět v tabulkách parametrů řezání (tab. 15 až tab. 19) pro plech tloušťky 5,0 mm. Takto vznikly řezy č. 11 až č. 15.

Tab. 15 Řezné parametry pro řez č. 11

Číslo řezu	Zdrojové parametry laseru	
11	výkon zdroje 2kW [%]:	80
	budicí frekvence [Hz]:	2000
	plnění [%]:	75
	Řídicí systém Haidenhain	
	rychlost řezání [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]:	500
	vzdálenost trysky od povrchu [mm]:	0,9

Tab. 16 Řezné parametry pro řez č. 12

Číslo řezu	Zdrojové parametry laseru	
12	výkon zdroje 2kW [%]:	80
	budicí frekvence [Hz]:	2000
	plnění [%]:	75
	Řídicí systém Haidenhain	
	rychlost řezání [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]:	50
	vzdálenost trysky od povrchu [mm]:	0,9

Tab. 17 Řezné parametry pro řez č. 13

Číslo řezu	Zdrojové parametry laseru	
13	výkon zdroje 2kW [%]:	95
	budicí frekvence [Hz]:	500
	plnění [%]:	95
	Řídicí systém Haidenhain	
	rychlost řezání [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]:	10
	vzdálenost trysky od povrchu [mm]:	0,9

Tab. 18 Řezné parametry pro řez č. 14

Číslo řezu	Zdrojové parametry laseru	
14	výkon zdroje 2kW [%]:	95
	budicí frekvence [Hz]:	500
	plnění [%]:	95
	Řídicí systém Haidenhain	
	rychlost řezání [mm.min ⁻¹]:	2
	vzdálenost trysky od povrchu [mm]:	0,9

Tab. 19 Řezné parametry pro řez č. 15

Číslo řezu	Zdrojové parametry laseru	
15	výkon zdroje 2kW [%]:	95
	budicí frekvence [Hz]:	500
	plnění [%]:	95
	Řídicí systém Haidenhain	
	rychlost řezání [mm.min ⁻¹]:	5
	vzdálenost trysky od povrchu [mm]:	0,9

Tuto tloušťku plechu jsme schopni prořezat při výkonu 95 %, což odpovídá 1900 W, a rychlosti řezání 5 mm.min⁻¹. Ovšem díky velice pomalému procesu řezání a vysoké hodnotě výkonu je do materiálu vneseno značné množství tepla, což může mít negativní vliv na výsledný řez. Jak je vidět na obr. 45, tepelně ovlivněná oblast řezů, ve srovnání s řezy na předchozích dvou tloušťkách plechů, je poměrně značná. Maximální 100 % výkon nebyl zvolen u žádného z řezů z důvodu bezpečnostních opatření laserového systému.

Počet řezů na jednotlivých vzorcích se odvíjel průběžně dle potřeby, jejich počet tedy nebyl předem přesně stanoven.

6 Měření a vyhodnocení dat

Po vytvoření skupiny řezů na každé použité tloušťce plechu testovaného materiálu, byly stanoveny vhodné metody vyhodnocení vzniklých vzorků. Byly použity jak odborné metalografické metody, tak i běžná vizuální kontrola.

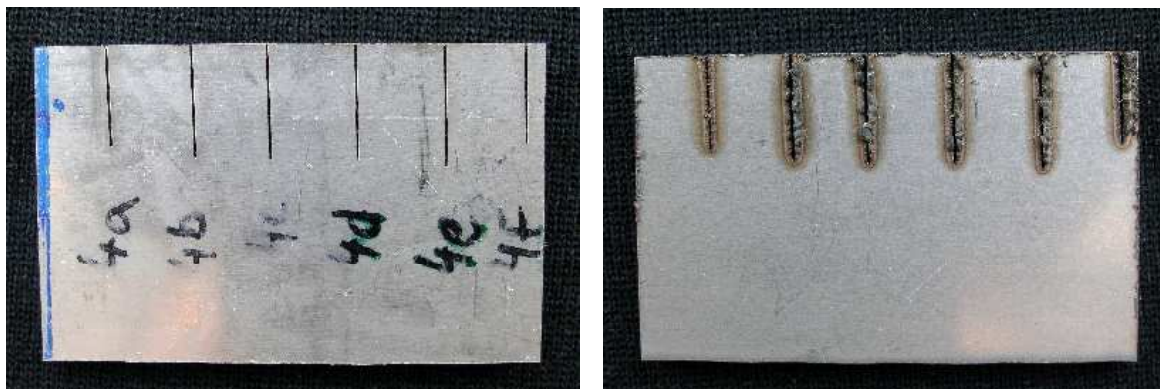
6.1 Metody vyhodnocování

Základním hodnotícím parametrem při vizuální kontrole byl fakt, zda laserový svazek prořezal či neprořezal danou tloušťku plechu. Věděli jsme, že když bude prořezána jeho plná tloušťka, pak bychom se měli dostat do oblasti přijatelných hodnot kvalitativních parametrů řezu. Jak jsme se ovšem přesvědčili v průběhu experimentu, toto tvrzení vždy platit nemusí.

Hodnocena byla především přetavená vrstva vznikající na vnitřních stěnách řezu. Má se za to, že tato vrstva, která vzniká za přispění většinou krátkodobého, ale velmi intenzivního působení energie laserového svazku v oblasti řezu, má amorfni charakter. V určitých případech tedy může být iniciátorem interkrystalických trhlin. Její vznik je pro nás tedy nežádoucím jevem, ovšem zcela zabránit jejímu vzniku patrně nelze. Naproti tomu, tepelně ovlivněná oblast řezu je u tohoto typu dělení materiálů, při optimálně zvolených parametrech řezání, velmi malá. Je to zapříčiněno možností velké rychlosti řezání laserových systémů, kdy se základní materiál v okolí řezu nestačí tak rychle prohřát a absorbovat tepelnou energii laserového svazku. Je tomu také napomáháno působením procesního plynu, který vyfukuje vznikající taveninu ven z řezu a zároveň ho chrání před působením okolní atmosféry. Tavenina následně chladne mimo řez na spodní straně plechu a tvoří otřep.

6.2 Metalografické hodnocení

Příprava metalografických výbrusů byla vedena podle standardních postupů. Po vytvoření řezů pomocí laseru na všech testovaných tloušťkách plechů, byly tyto plechy na stolním řezacím zařízení rozřezány na menší části. Každá část rozřezaných plechů obsahovala přibližně 5 až 6 řezů vytvořených laserem. Tyto byly následně kolmo přerežány, abychom zajistili přístup pro pohled do řezu.



Obr. 46 Ukázka přípravy vzorků pro metalografický výbrus

6.2.1 Rámcový postup přípravy metalografických výbrusů

- **Nařezání vzorků na menší části:**

Na stolním řezacím zařízení pro manuální řezání metalografických vzorků diamantovým kotoučem. Aby nedošlo k tepelnému ovlivnění řezu, čímž by mohlo dojít ke zkreslení výsledků, byla oblast řezu intenzivně chlazena vodou s příměsí aditiv.

- **Preparace vzorků:**

Na zalévacím lisu Struers pro zalévání za tepla do pryskyřice. Takto byly připraveny jen některé části vzorků, které byly příliš malých rozměrů a obtížně by se upínaly do přípravku metalografického zařízení pro broušení a leštění.

- **Broušení a leštění:**

Na metalografickém zařízení Struers pro broušení a leštění, umožňující brousit a leštit více vzorků současně. Broušení bylo provedeno v několika krocích na papírech typu SiC. Byla použita následující zrnitost brusných SiC papírů: 80, 160, 320, 640, 1200 a 2400. Pro leštění bylo použito leštící diamantové sukno typu MD-Mol zrnitosti 3 μm a diamantová leštící suspenze.

- **Leptání:**

Použito leptací činidlo Vilella (2 díly kys. chlorovodíkové + 1 díl kys. dusičné + 2 díly glycerinu [19]). Leptáno za pokojové teploty.

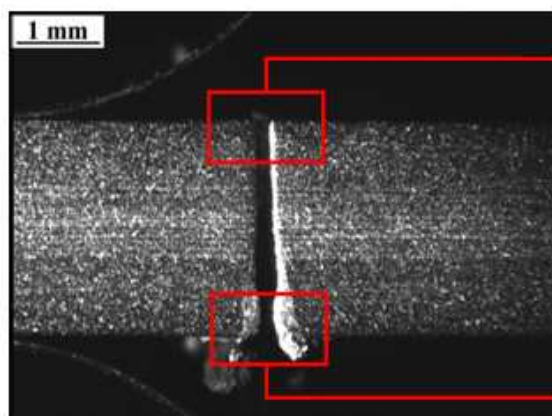
- **Dokumentace vzniklých metalografických výbrusů:**

Na světelném mikroskopu ZEISS Jena NEOPHOT 21 pomocí softwaru QuickPHOTO Industrial 2.2.

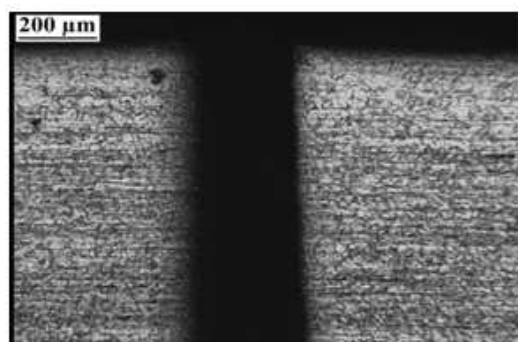
6.3 Dokumentace metalografických výbrusů

Vzhledem k velkému počtu pořízených fotografií, jejichž sdělení je ve své podstatě obdobné, byly vybrány jen ty, které charakterizují danou skupinu problematiky či vzorku.

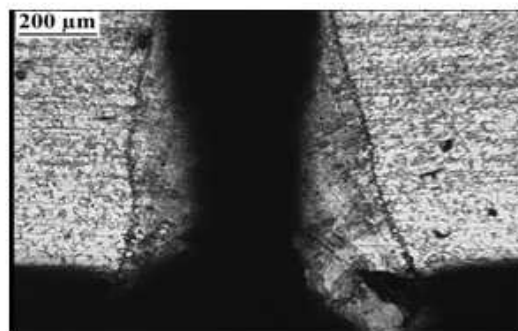
- Řez č. 1 (tloušťka plechu 2,5 mm – výkon 90 %, rychlost řezání 500 mm.min⁻¹)



Obr. 47 Celkový pohled na řez
(zvětšeno 10x, leptadlo Vilella)



Obr. 48 Detail vrchní části řezu
(zvětšeno 50x, leptadlo Vilella)

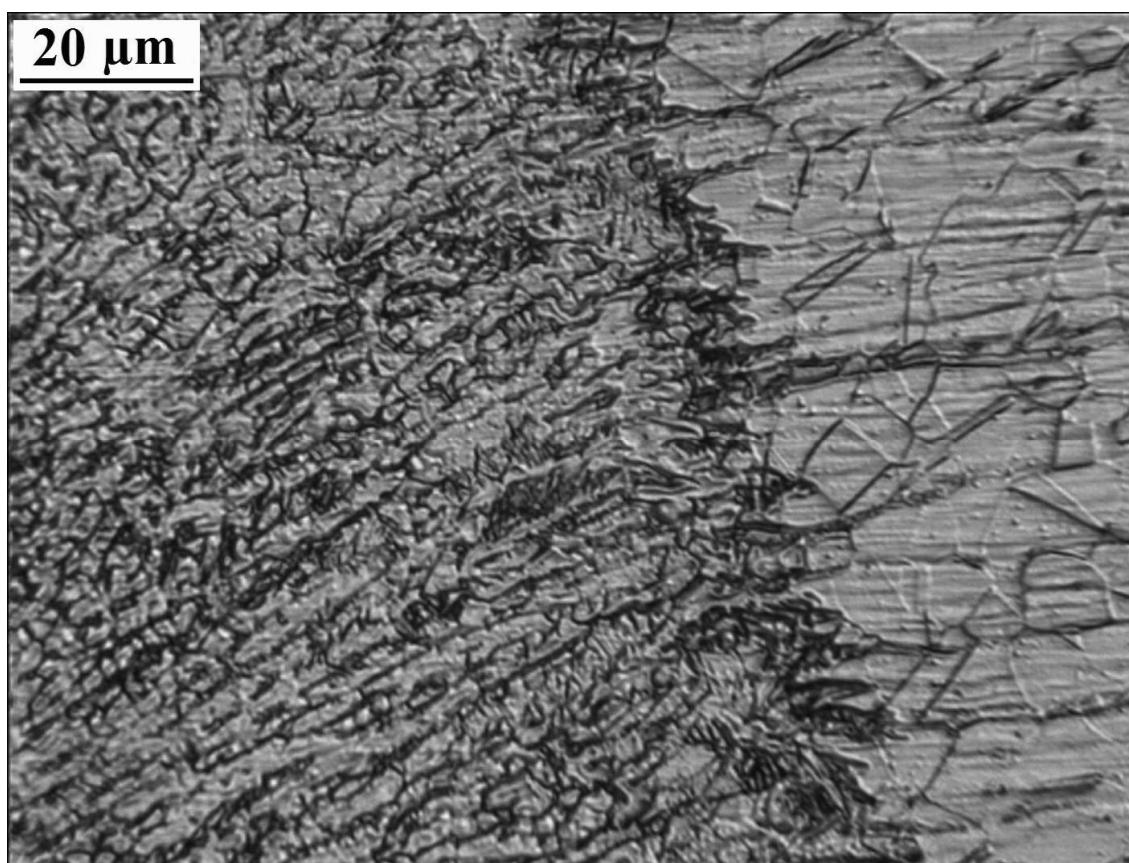


Obr. 49 Detail spodní části řezu
(zvětšeno 50x, leptadlo Vilella)

Na obr. 47 je fotografie celkového pohledu na řez č. 1. Osvětlená stěna řezu na pravé části v tomto případě zcela nepředstavuje přetavenou vrstvu, ale je to důsledek použité metody dokumentace metalografického výbrusu na světelném mikroskopu.

Na obr. 48 není vidět žádná přetavená vrstva, ovšem nepatrná vrstvička se na stěnách řezu pravděpodobně vyskytuje vždy. Průřez se zdá být souměrný, bez větších tvarových deformací. Můžeme si ale všimnout, že rohy průřezu na obou stranách směřují mírně vzhůru. Tato nepatrná deformace se dá pozorovat i na spodní části řezu, kde naopak směřují směrem dolů.

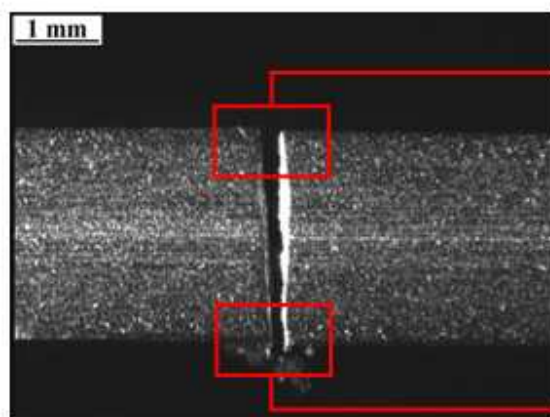
Na obr. 49 na spodní části řezu můžeme zaznamenat vznik nesouměrného rozložení přetavené vrstvy. Všimněme si, že se jedná o jakýsi trychtýřovitý tvar. Má se za to, že k tomuto dochází vlivem bariéry, která vzniká díky tavenině soustředěné ve spodní části řezu. Ta se následně po ztuhnutí projevuje jako otřep na spodní hraně řezu. Díky tomu se v těchto místech hromadí teplo, vznikající při procesu řezání, které nemá možnost odcházet pryč z okolí řezu. Dojde k lokálnímu přehřátí, změně tvaru průřezu a zvětší se také objem přetavené vrstvy.



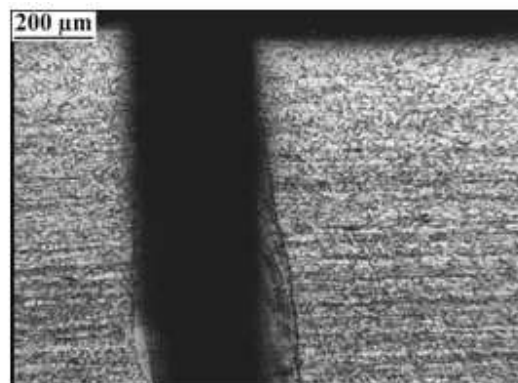
*Obr. 50 Detail hranice natavení
(zvětšeno 500x, leptadlo Vilella)*

Na obr. 50 je patrná hranice natavení přetavené vrstvy ve spodní části řezu. Přetavená vrstva představuje oblast v levé části obrázku. V pravé části je patrná austenitická struktura slitiny Haynes 718.

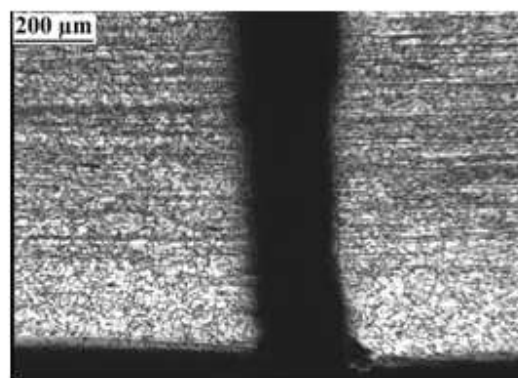
- Řez č. 4 (tloušťka plechu 2,5 mm – výkon 60 %, rychlost řezání 500 mm.min⁻¹)



Obr. 51 Celkový pohled na řez
(zvětšeno 10x, leptadlo Vilella)



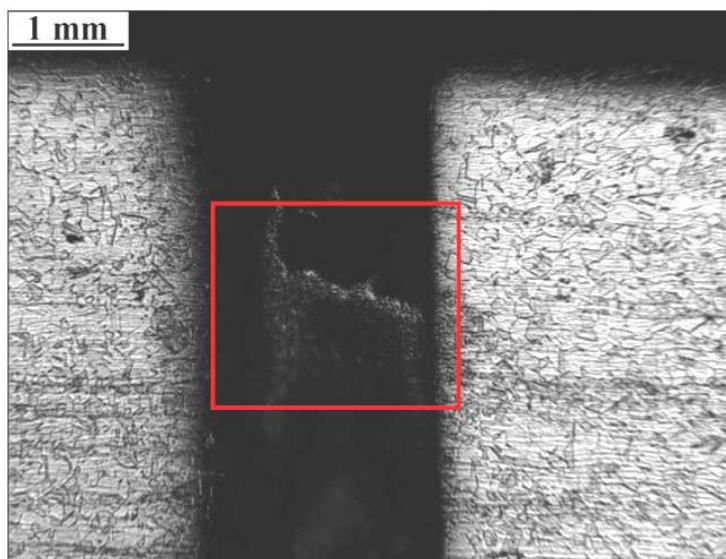
Obr. 52 Detail vrchní části řezu
(zvětšeno 50x, leptadlo Vilella)



Obr. 53 Detail spodní části řezu
(zvětšeno 50x, leptadlo Vilella)

Tento řez na plechu tloušťky 2,5 mm byl po vizuální kontrole vybrán jako nejkvalitnější. Můžeme vidět, že se i z hlediska velikosti přetavené vrstvy jeví poměrně dobře.

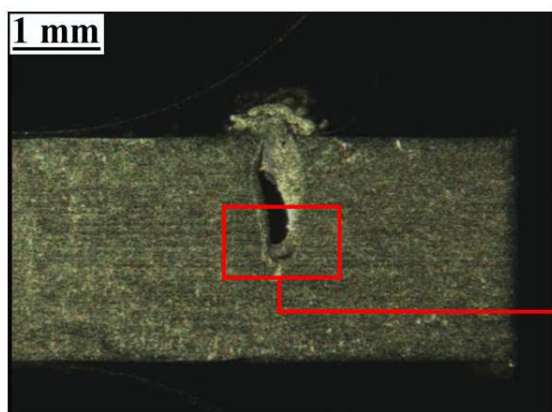
- Řez č. 4c (tloušťka plechu 2,5 mm – výkon 60 %, rychlost řezání 700 mm.min⁻¹)



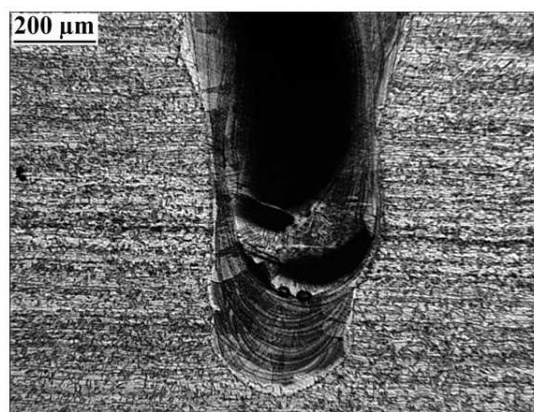
Obr. 54 Vrchní část řezu
(zvětšeno 100x, leptadlo Vilella)

Shluk částic, viditelný na obr. 54 ve spáře řezu na černém pozadí není u laserového obrábění ničím neobvyklým. Jedná se o nedokonalost ve smyslu čistoty řezu, která se může objevit v určitých místech řezu po zhotovení metalografického výbrusu. Toto může být způsobeno například krátkodobým poklesem tlaku asistenčního plynu při procesu řezání.

- Řez č. 6 (tloušťka plechu 2,5 mm – výkon 55 %, rychlost řezání 500 mm.min⁻¹)



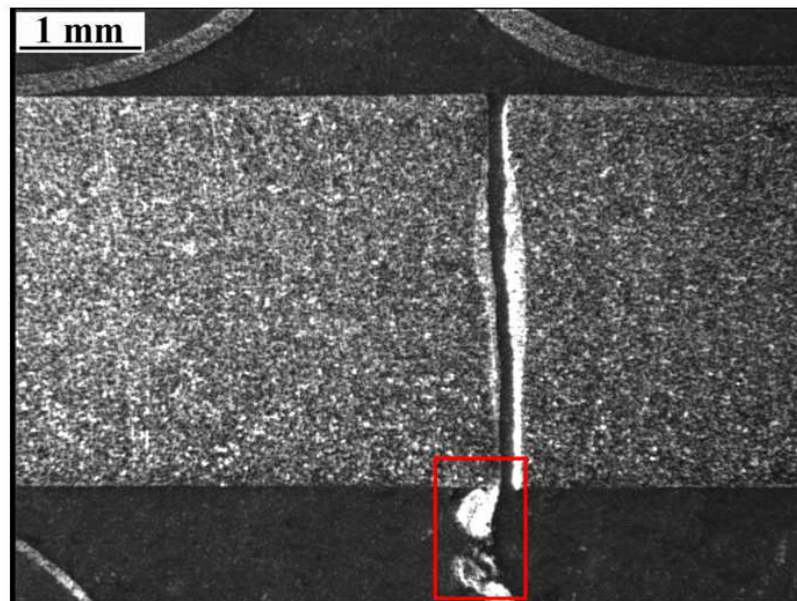
Obr. 55 Celkový pohled na řez
(zvětšeno 10x, leptadlo Vilella)



Obr. 56 Detail kořene řezu
(zvětšeno 50x, leptadlo Vilella)

Na obr. 55 je fotografie řezu, který neprošel celou tloušťkou plechu a je prořezán asi jen do poloviny celkové tloušťky plechu. Toto je pro nás nepřijatelný stav, který byl zapříčiněn nedostatečným výkonem laseru.

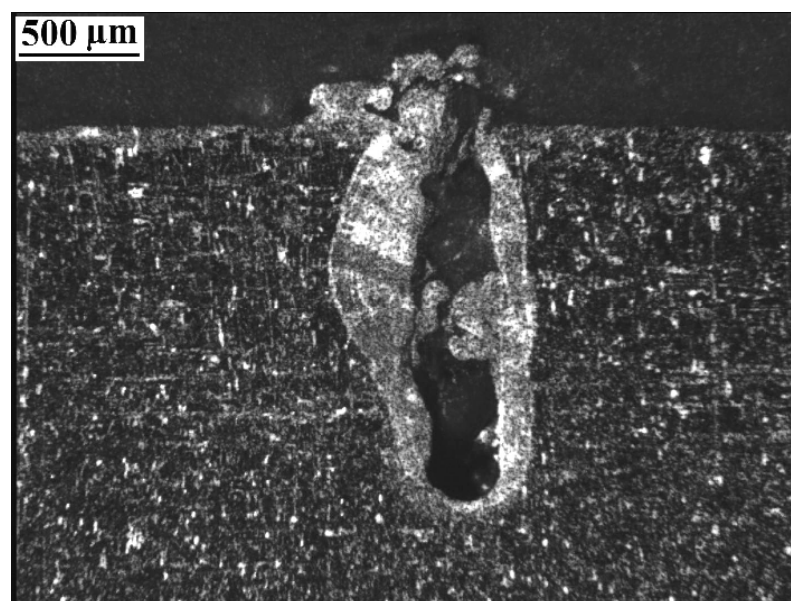
- Řez č. 8a (tloušťka plechu 3,2 mm – výkon 80 %, rychlost řezání 500 mm.min⁻¹)



Obr. 57 Celkový pohled na řez
(zvětšeno 10x, leptadlo Vilella)

Příčinou otřepu vznikajícího převážně na levé straně řezu je patrně nepřesné seřízení polohy středu laserového svazku vůči středu fokusační čočky a středu trysky. K tomuto seřízení slouží speciální „nastřelovací“ papíry. V tomto případě se ovšem nejedná o nějaký závažnější problém, který by výrazným způsobem ovlivňoval kvalitu řezu.

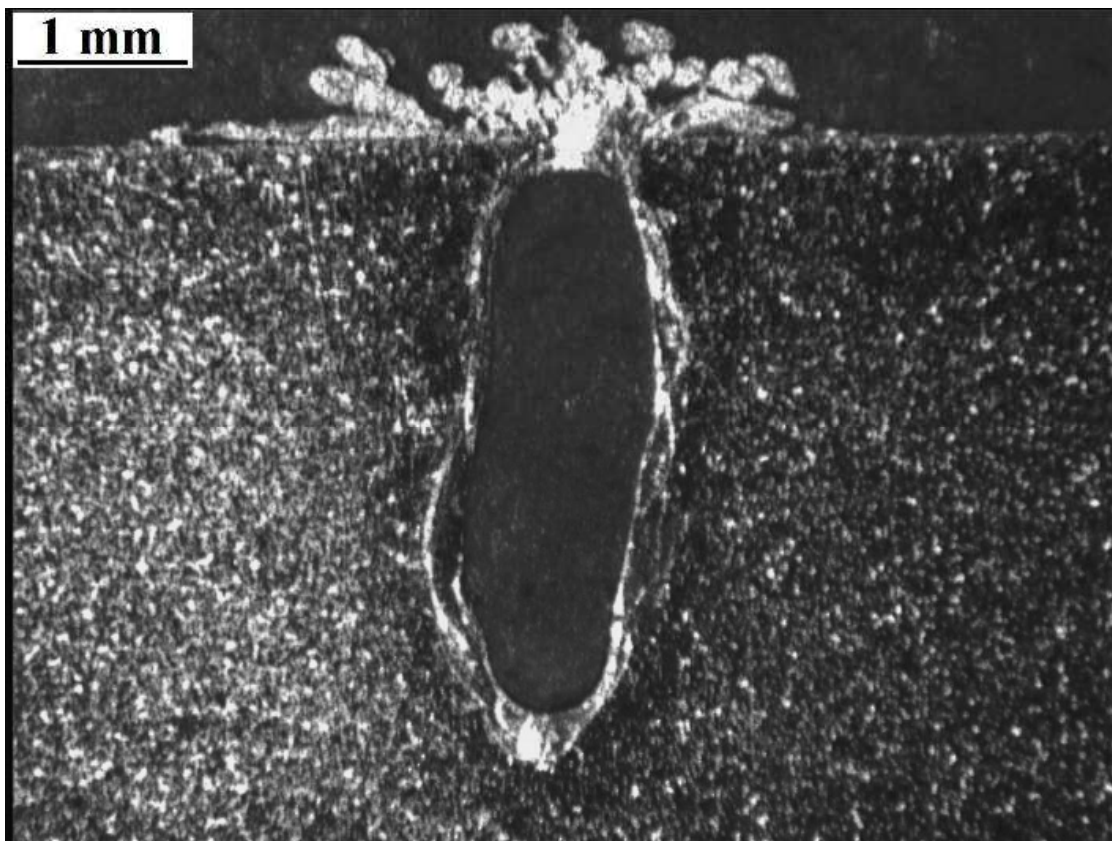
- Řez č. 12 (tloušťka plechu 5,0 mm – výkon 80 %, rychlost řezání 50 mm.min⁻¹)



Obr. 58 Detail neprořezané spáry
(zvětšeno 20x, leptadlo Vilella)

Na obr. 58 je zobrazen detail řezu, který neprošel celou tloušťkou plechu, což bylo zapříčiněno nedostatečným výkonem. Díky razantnímu snížení rychlosti řezání oproti předchozím řezům, se v místě řezu vytvořila velká přetavená vrstva.

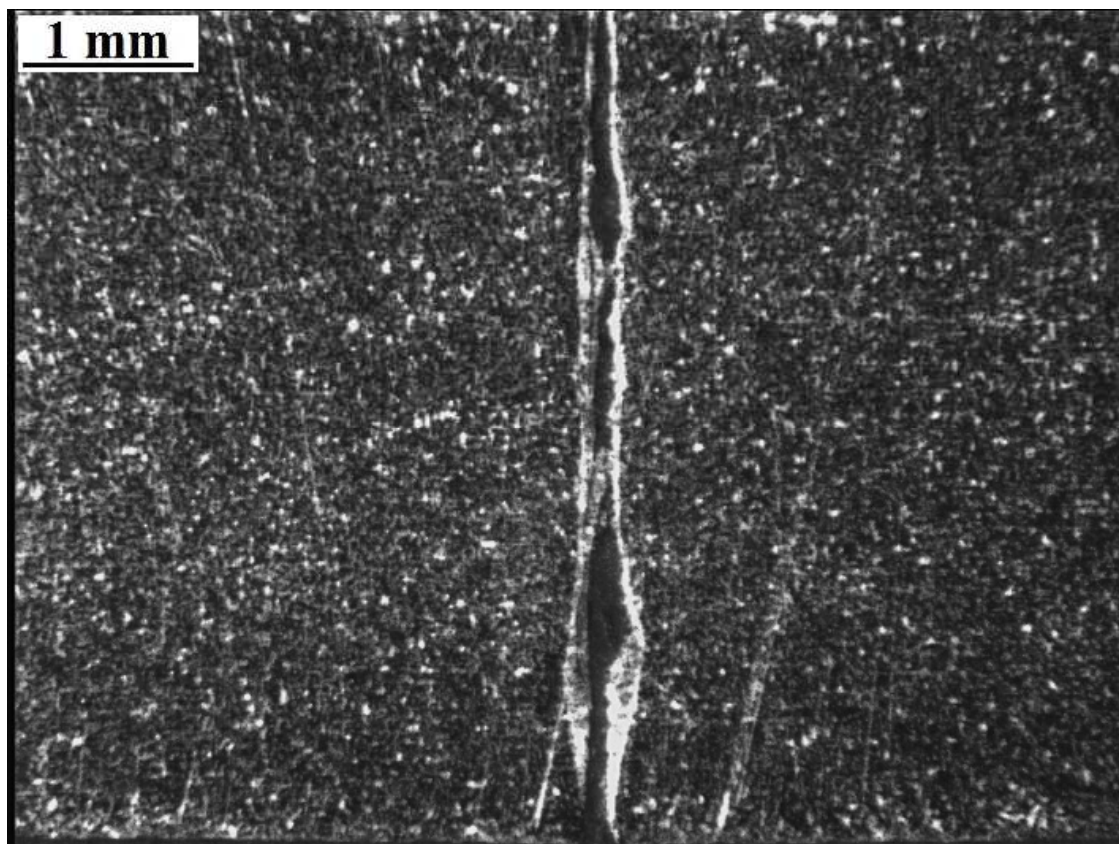
- Řez č. 14 (tloušťka plechu 5,0 mm – výkon 95 %, rychlost řezání $2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$)



*Obr. 59 Detail neprořezané spáry
(zvětšeno 10x, leptadlo Vilella)*

Díky téměř mezním hodnotám maximálního výkonu a minimální rychlosti řezání, použitých v experimentu, došlo v oblasti řezu k intenzivnímu a značnému ohřevu materiálu. To zapříčinilo tavení materiálu v řezné spáře a velké tvarové deformace.

- Řez č. 15 (tloušťka plechu 5,0 mm – výkon 95 %, rychlost řezání 5 mm.min⁻¹)



*Obr. 60 Celkový pohled na řez
(zvětšeno 10x, leptadlo Vilella)*

Na obr. 60 je fotografie řezu č. 15, který jako jediný na plechu tloušťky 5,0 mm prošel jeho celou tloušťkou. Díky vysokým hodnotám výkonu a nízké rychlosti řezání ovšem můžeme pozorovat značnou tvarovou nedokonalost a nesouměrnost průběhu řezné spáry.

7 Diskuze experimentálních prací

7.1 Kontrolované parametry

- **Výkon zdroje laseru [W]:**

Maximální výkon je omezen konstrukcí zdroje, odolností zrcadel rezonátoru a také odvodem a rozptylem parazitního tepla z aktivní oblasti. Předpokladem je to, že je k dispozici dostatek budící energie [18].

V našem případě byl maximální výkon zdroje laseru 2000 W. Při experimentu bylo použito rozmezí hodnot maximálního výkonu 50 % až 95 %, tedy 1000 W až 1900 W. Maximální výkon 2000 W nebyl použit z bezpečnostních důvodů a předejití možnému poškození laserového zařízení. Toto doporučuje i výrobce zařízení.

- **Rychlost řezání [mm.min⁻¹]:**

Představuje spolu s výkonem laserového zdroje nejdůležitější parametr procesu řezání, mající podstatný vliv na výsledný řez. Při experimentu bylo použito široké rozmezí hodnot rychlosti řezání, 2 mm.min⁻¹ až 900 mm.min⁻¹.

- **Budicí frekvence zdroje [Hz]:**

Laser začne vyzařovat „laserové“, tj. koherentní, stimulované, monochromatické a polarizované světlo teprve od určité, prahové budící energie. Její velikost je dána vlastnostmi aktivního prostředí, tedy snadností, s jakou je možné dosáhnout inverze populace, a též konstrukcí laseru – hlavně objemem aktivní oblasti. Významnou roli může hrát i typ a kvalita rezonátorů [18].

V našem případě byly zvoleny dvě hodnoty budící frekvence, 500 Hz a 2000 Hz, v závislosti na tloušťce plechu řezaného materiálu.

- **Plnění [%]:**

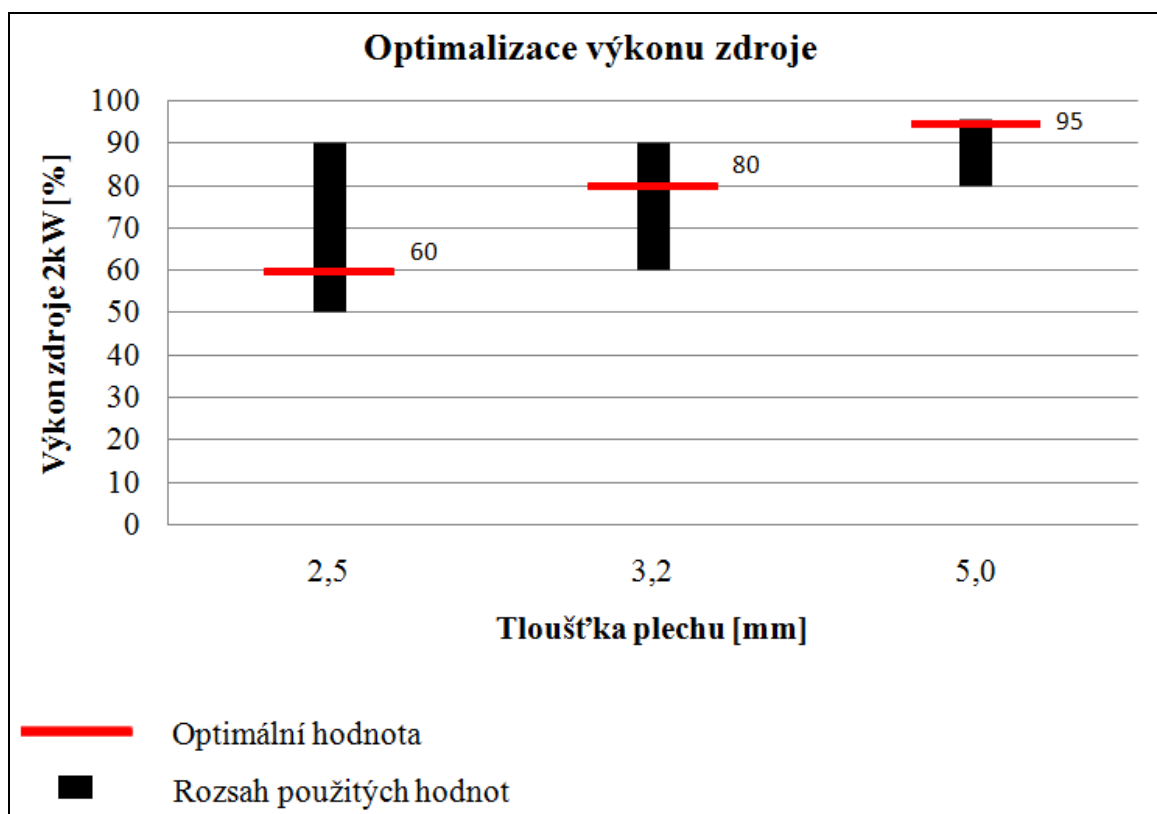
Představuje součin délky impulzu a opakovací frekvence. V našem případě byly zvoleny dvě hodnoty plnění, 75 % a 95 %, v závislosti na tloušťce plechu řezaného materiálu.

- **Vzdálenost trysky od povrchu materiálu [mm]:**

Při experimentu byla vzdálenost trysky od povrchu plechu nastavena na hodnotu 0,9 mm a to po jeho celou dobu. Může se měnit v závislosti na průběhu řezání.

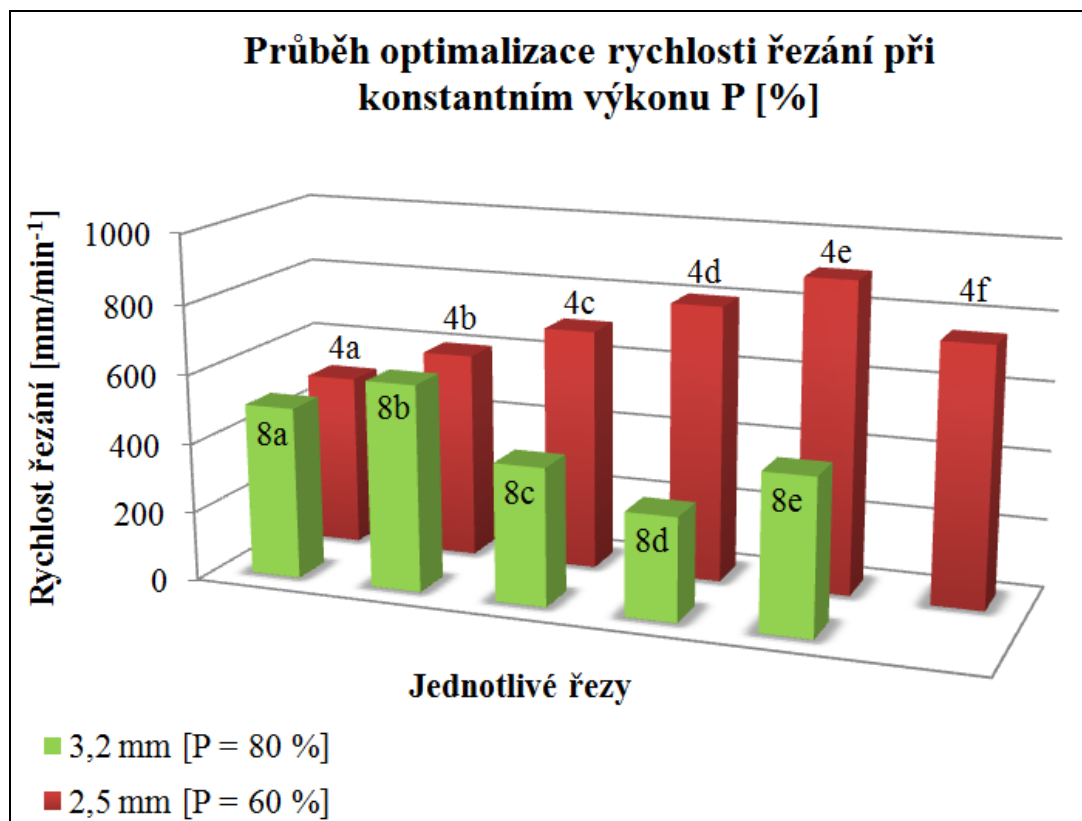
Dochází-li při řezání k tvorbě velkého množství taveniny a tryska je příliš blízko řezaného povrchu, pak mohou kapky taveniny ulpívat na otvoru řezací trysky, čímž dojde k přerušení procesu z důvodu bezpečnosti zařízení. Pak se musí vzdálenost trysky vhodně upravit.

7.2 Grafické znázornění kontrolovaných parametrů

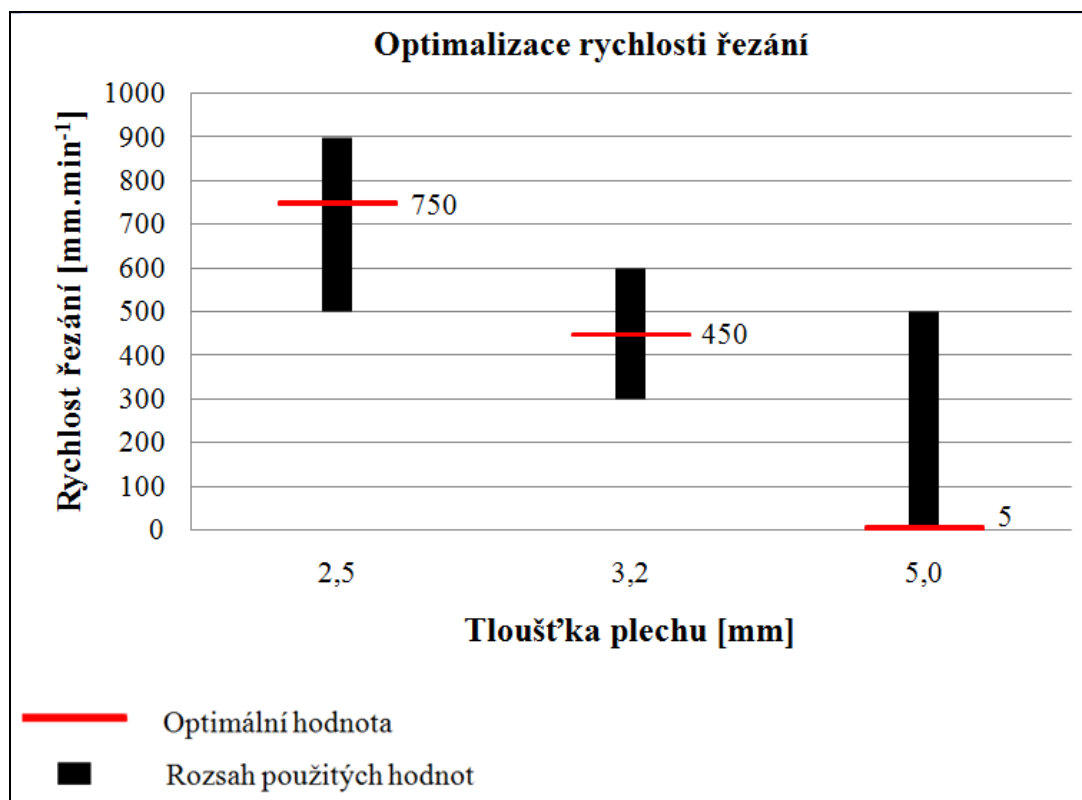


Obr. 61 Graf použitých hodnot při optimalizaci výkonu zdroje a jeho optimální hodnoty pro dané tloušťky použitých plechů

Na obr. 61 je v grafu vyznačen rozsah použitých hodnot při optimalizaci výkonu zdroje na každé, z použitých tloušťek plechů. Zároveň je zde vyznačena optimální hodnota výkonu pro každou tloušťku plechu.

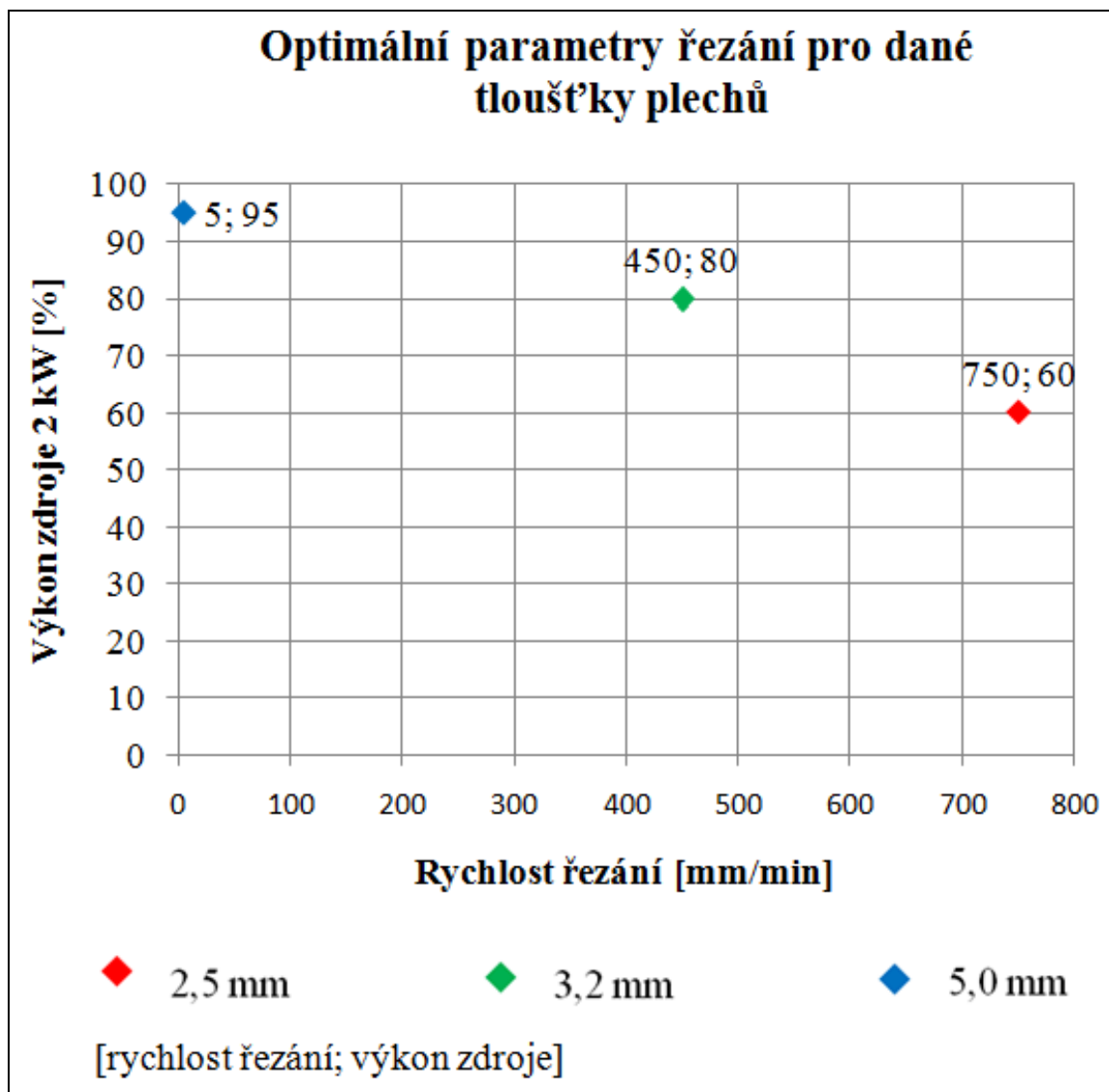


Obr. 62 Graf průběhu optimalizace rychlosti řezání při konstantním výkonu pro danou tloušťku plechu



Obr. 63 Graf použitých hodnot při optimalizaci rychlosti řezání a její optimální hodnoty pro dané tloušťky použitých plechů

Na obr. 63 je v grafu vyznačen rozsah použitých hodnot při optimalizaci rychlosti řezání na každé, z použitých tloušťek plechů. Zároveň je zde vyznačena optimální hodnota rychlosti řezání pro každou tloušťku plechu.



Obr. 64 Graf zjištěných optimálních parametrů řezání pro dané tloušťky použitých plechů

Na obr. 64 jsou vyznačeny optimální hodnoty výkonů zdroje a rychlostí řezání, pro všechny tři použité tloušťky plechů.

Pro plech tloušťky 2,5 mm: výkon 60 %, tedy 1200 W, a rychlost řezání 750 mm.min⁻¹.

Pro plech tloušťky 3,2 mm: výkon 80 %, tedy 1600 W, a rychlost řezání 450 mm.min⁻¹.

Pro plech tloušťky 5,0 mm: výkon 95 %, tedy 1900 W, a rychlosti řezání 5 mm.min⁻¹.

7.3 Alternativa jiné technologie výroby

Tab. 20 Kvalitativní porovnání alternativních metod řezání/dělení materiálů vzhledem k technologii řezání CO₂ laserem [6]

	Nd-YAG	Plazma	AWJ	Kyslíkový plamen
Kapitálové náklady	P	D	P	VD
Provozní náklady	P	P	P	D
KOVOVÉ MATERIÁLY				
Rychlost	S	D	VS	S
Kvalita řezu	P - D	VS	VD	S
Maximální tloušťka	P - D	VD	VD	VD
Šířka řezu	P	VS	VS	VS
NEKOVOVÉ MATERIÁLY				
KERAMIKA				
Rychlost	S	N	S	N
Kvalita řezu	P - D	N	D	N
Maximální tloušťka	P - D	N	VD	N
Šířka řezu	P - D	N	S	N
POLYMERY				
Rychlost	N	N	P	N
Kvalita řezu	N	N	P	N
Maximální tloušťka	N	N	D	N
Šířka řezu	N	N	S	N

N – nepoužitelné, VD – velmi dobré, D – dobré, P – podobné, S – slabé, VS – velmi slabé

Laser se v současnosti používá přednostně na řezání/dělení materiálů, z tohoto důvodu se kvalitativní porovnání laseru vztahují k technologiím, které mají podobné využití (AWJ, plazma, kyslíkový plamen) [6].

Tyto technologie lze porovnávat spíše u 2D řezání, při složitějších operacích 3D řezání již na alternativní využití uvedených technologií musí být nahlíženo s rezervou.

V tomto případě se budou spíše uplatňovat jiné technologie, například elektrojiskrové drátové řezání. Avšak vzhledem k hlavním přednostem laserové technologie, kterými jsou rychlost a snadná regulace procesu řezání, jde v našem případě spíše o teoretickou úvahu.

7.4 Závěrečná doporučení

Z hlediska možného ovlivnění řezu okolní atmosférou je vhodné proměřit přetavenou vrstvu mikrosondou a následně provést mikrochemickou analýzu. Doporučuje se věnovat zvýšenou pozornost studiu přetavené vrstvy a jejího růstu v závislosti na parametrech řezání. Vhodné bude také naměření mikrotvrdosti na hranici natavení (základní materiál – přetavená vrstva) a především přetavené vrstvy samotné.

8 Závěr

Cílem této práce byla optimalizace řezných parametrů v oblasti řezání niklové slitiny na kontinuálním plynovém CO₂ laseru. Snahou bylo zjistit, jakou maximální tloušťku plechu niklové slitiny Haynes 718 dokáže laserový systém prořezat. Také bylo potřeba popsat vliv parametrů řezání na výslednou strukturu řezu z hlediska tvarových deformací řezné spáry a vzniku přetavené vrstvy, která je nežádoucím doprovodným jevem procesu řezání.

Byly použity plechy o třech různých tloušťkách, a sice 2,5 mm, 3,2 mm a 5,0 mm. Plechy tloušťky 2,5 mm a 3,2 mm sloužily k optimalizaci parametrů řezání. Na plechu tloušťky 5,0 mm jsme se chtěli přesvědčit, zda laserový systém ještě dokáže prořezat jeho celou tloušťku.

Nejdůležitějšími parametry řezání, mající největší vliv na výsledný řez, byly v našem případě výkon zdroje laseru a rychlost řezání. Dalšími kontrolovanými parametry, které již nemají tak podstatný vliv na výslednou kvalitu řezu, byly: budící frekvence zdroje, plnění a vzdálenost trysky od povrchu řezaného plechu.

Všechny řezy byly zhotoveny v délce 10 mm. Jejich rozmístění, respektive vzdálenosti jednotlivých řezů mezi sebou, nebylo zvoleno podle pevného schématu. Bylo empiricky zvoleno tak, aby mezera mezi řezy byla dostatečná z hlediska případného vzájemného tepelného ovlivnění sousedních řezů.

Nejprve byl optimalizován, na tloušťkách 2,5 mm a 3,2 mm, výkon zdroje laseru. Při konstantní rychlosti řezání se měnil pouze výkon. Vytvořili jsme počet řezů, který nebyl předem stanoven, ale odvíjel se od průběhu experimentu. Při optimalizaci výkonu pro nás bylo určující, zda laserový svazek prořezal celou tloušťku plechu. Poté se vybral z vytvořených řezů na každé tloušťce plechu ten, který vykazoval nejlepší kvalitativní parametry. Těmi byly čistota řezu a velikost napálené strusky na spodní straně plechu.

Po té byla optimalizovaná rychlost řezání na nejkvalitnějším z řezů, vytvořených na každé z těchto dvou tlouštěk plechů, při předešlé optimalizaci výkonu zdroje. Při konstantním výkonu, který byl pro každou tloušťku plechu nalezen jako optimální, se měnila pouze rychlost řezání.

Můžeme tedy konstatovat, že pro tento typ slitiny a tloušťku plechu 2,5 mm se zdají být optimální parametry řezání odpovídající těm, pomocí kterých byl vytvořen řez č. 4f. Tzn. výkon 1200 W, rychlost řezání 750 mm.min⁻¹.

Pro tloušťku plechu 3,2 mm se pak zdají být optimální parametry řezání odpovídající těm, pomocí kterých byl vytvořen řez č. 8e. Tzn. výkon 1600 W, rychlost řezání 450 mm.min⁻¹.

Posledním testovaným byl plech o tloušťce 5,0 mm. U takto velké tloušťky plechu jsme očekávali možné potíže s jeho prořezáním. Po několika neúspěšných pokusech plech prořezat se nakonec ukázalo, že plynový CO₂ laser s maximálním výkonem 2 kW, je schopen plech tloušťky 5,0 mm prořezat. Tato tloušťka plechu byla prořezána při výkonu 95 %, což odpovídá 1900 W, a rychlosti řezání 5 mm.min⁻¹. Ovšem díky velice pomalému procesu řezání a vysoké hodnotě výkonu je do materiálu vneseno značné množství tepla, což může mít negativní vliv na výsledný řez, především z hlediska značné tepelně ovlivněné oblasti řezu.

Po vytvoření všech řezů a jejich vizuální kontrole byly provedeny, podle standardních postupů, metalografické výbrusy. Díky tomu jsme mohli vidět průřezy všech řezů, které byly pomocí laseru vytvořeny.

Hodnocena byla především přetavená vrstva vznikající na vnitřních stěnách řezu. Má se za to, že tato vrstva, která vzniká za přispění většinou krátkodobého, ale velmi intenzivního působení energie laserového svazku v oblasti řezu, má amorfní charakter. V určitých případech tedy může být iniciátorem interkrystalických trhlin. Její vznik je pro nás tedy nežádoucím jevem, ovšem zcela zabránit jejímu vzniku patrně nelze.

U řezů, které prošly celou tloušťkou plechu se ve většině případů nevyskytovaly výraznější tvarové deformace spáry řezu. Přetavená vrstva nebyla rozložena souměrně po celé délce spáry řezu. V její horní polovině nebyla patrná žádná přetavená vrstva, ovšem nepatrná vrstvička se zde patrně vyskytuje vždy. Ve spodní polovině spáry řezu byla přetavená vrstva rozložena nesouměrně. Jednalo se o jakýsi trychtýřovitý tvar. Došli jsme k závěru, že k tomuto dochází vlivem tepelné bariéry, která vzniká díky tavenině soustředěné ve spodní části řezu. Ta se následně po ztuhnutí projevuje jako otřep na spodní hraně řezu. Díky tomu se v těchto místech hromadí teplo, vznikající při procesu řezání, které nemá možnost odcházet pryč z okolí řezu. Dojde k lokálnímu přehřátí, změně tvaru průřezu a zvětší se také objem přetavené vrstvy.

9 Seznam použité literatury

- [1] GAVRILOV, P.; JELÍNKOVÁ, H.; VRBOVÁ, M. *Úvod do laserové techniky*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1994. 235 s. Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská. ISBN 80-01-01108-9.
- [2] BENKO, B., et al. *Laserové technológie*. 1. vyd. Bratislava : STU Bratislava, 2000. 122 s. ISBN 80-227-1425-9.
- [3] ŘASA, J.; POKORNÝ, P.; GABRIEL, V. *Strojírenská technologie 3 - 2.díl : Obráběcí stroje pro automatizovanou výrobu, fyzikální technologie obrábění*. 2. vyd. Praha : Scientia, spol. s.r.o., pedagogické nakladatelství, 2001. 221 s. ISBN 80-7183-336-3.
- [4] SADÍLEK, M. *Nekonvenční metody obrábění I*. 1. vyd. Ostrava : Ediční středisko VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2009. 152 s. ISBN 978-80-248-2107-8.
- [5] ŘASA, J.; JINDROVÁ, R. *Lasery, laserové technologie a stroje s laserem*. MM Průmyslové spektrum. 2006, 7, s. 34. ISSN 1212-2572
- [6] MIČIETOVÁ, A.; MAŇKOVÁ, I.; VELÍŠEK, K. *Top trendy v obrábění V : Fyzikálne technológie obrábania*. Žilina : Media/ST s.r.o., 2007. 232 s. ISBN 8096895472.
- [7] Skupina ČEZ [online]. 2010 [cit. 2010-01-08]. *Cesta k objevu*. Dostupné z WWW: <<http://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/k12.htm>>.
- [8] FLORA ITALIANA [online]. 2010 [cit. 2010-01-08]. *Laserpitium latifolium*. Dostupné z WWW: <http://luirig.110mb.com/biol-az2/1/laserpitium_latifolium.htm>.
- [9] ŘASA, J.; KEREČANINOVÁ, Z. *Nekonvenční metody obrábění - 5. díl*. MM Průmyslové spektrum. 2008, 5, s. 68. ISSN 1212-2572
- [10] STEEN, W. *Laser Material Processing*. 1. vyd. London : Springer, 1991. 266 s. ISBN 3-540-19670-6.

- [11] READY, J.F. *LIA Handbook of Laser Materials Processing*. 1. vyd. Laser Institute of America, Orlando, FL : Magnolia Publishing, Inc., 2001. Laser Cutting, s. 425-470. ISBN 0-912035-15-3.
- [12] SADOWSKI, A.; KREHLIK, R. *Lasery v obrábění a metrologii*. 1. vyd. Praha : SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1977. 120 s.
- [13] KOŘÁN, P. *Poslední trendy ve svařování laserem*. MM Průmyslové spektrum. 2009, 10, s. 34. ISSN 1212-2572
- [14] VASILKO, K.; KMEC, J. *Delenie materiálu*. 1. vyd. Prešov : DATAPRESS, 2003. 232s. ISBN 80-7099-903-9.
- [15] *Winbro Group Technologies* [online]. 2008 [cit. 2010-03-07]. Systems Delta. Dostupné z WWW: <<http://www.winbrogroup.com/systems/delta.php>>.
- [16] *Rofin* [online]. 2010 [cit. 2010-03-09]. Rofin DC Series. Dostupné z WWW: <<http://www.rofin.com/index.php?id=161&L=1>>.
- [17] *Haynes International, Inc.* [online]. 2001 [cit. 2010-03-14]. High-Temperature Alloys. Dostupné z WWW: <<http://www.haynesintl.com/718HaynesAlloy.htm>>.
- [18] HULICIUS, E. *Optoelektronika – polovodičové zdroje záření*. Fyzikální ústav Akademie věd ČR [online]. 2006, [cit. 2010-05-02]. Dostupný z WWW: <<http://archiv.otevrena-veda.cz/users/Image/default/C1Kurzy/NH2006pdf/7.pdf>>.
- [19] PÍŠEK, F. *Nauka o materiálu II/2*. Praha : NČAV, 1959. 659 s.

10 Seznam příloh

Příloha A Specifikace materiálu Haynes 718.

Poděkování

Rád bych na tomto místě vyjádřil poděkování zaměstnancům firmy Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o., jmenovitě pak Ing. J. Ziegelheimovi, Ph.D. a Mgr. V. Halenkovi, za ochotnou spolupráci, odborné rady i čas, který mi věnovali při konzultacích.

Zvláštní poděkování patří vedoucí diplomové práce Mgr. Ing. Janě Novákové za vedení, cenné rady a připomínky při její tvorbě .

Nemohu opomenout poděkovat svým rodičům a celé své rodině za jejich neocenitelnou podporu, kterou mi poskytovali po celou dobu mého studia.